



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN DE REDES BAJO EL ESTÁNDAR IEEE 802.11
MEDIANTE TERMINALES MÓVILES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CARLOS ALFREDO LEYVA TLAPA

TUTOR PRINCIPAL
DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

MÉXICO, FEBRERO DE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Arana Hernández Oscar
Secretario: Dr. García Jiménez Luis Francisco
1 er. Vocal: Dr. Gómez Castellanos Javier
2 do. Vocal: Dr. Matías Maruri José María
3 er. Vocal: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique

La tesis se realizó en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Javier Gómez Castellanos



FIRMA

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a mis padres Josefina, David y a mi hermana Gabriela por su amor y apoyo incondicional, así como en su motivación para ayudarme a cumplir mis metas y proyectos.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de formarme profesionalmente desde hace tantos años dentro de sus instalaciones, también, al Posgrado de Ingeniería por permitirme especializarme en mi área de estudio asesorado por los profesores que lo conforman.

Un agradecimiento especial al Dr. Javier Gómez Castellanos por haberme dado la oportunidad de trabajar con él, también por su tiempo y asesoría en el desarrollo de este trabajo.

Quiero dar un agradecimiento especial a Francesc Wilhelmi por la ayuda brindada respecto al uso y operación del simulador Komondor desarrollado por él y su equipo de trabajo.

Por último, quiero mencionar al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para el trabajo de Maestría. También al proyecto PAPIIT- IN119820 por el apoyo otorgado para finalizar el trabajo presentado.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Definición del Problema	7
1.2. Hipótesis	8
1.3. Objetivos	8
1.4. Metodología	8
1.5. Contribución	9
1.6. Contenido	9
2. Marco Teórico y Estado del Arte	11
2.1. Bandas ISM	11
2.2. Estándar IEEE 802.11	11
2.3. Capa PHY	13
2.4. Capa MAC	13
2.5. Algoritmos de selección de canal	14
2.6. Modelos de movilidad	16
2.7. Métodos de localización de nodos en redes inalámbricas	16
2.8. DoE (<i>Direction of Encounter</i>)	17
2.9. Estado del Arte	17
3. Consideraciones generales de los algoritmos propuestos	21
3.1. Consideraciones Generales	21
3.2. Modelo de propagación	22
3.3. Configuraciones de operación	22
3.4. Densidad de la red	23
3.5. Throughput promedio	23
3.6. Simulador Komondor	24
3.7. Simulación	24
3.8. Plataforma de simulación	27
4. Algoritmo de selección de canal	29
4.1. Caso 1. La terminal móvil detecta sólo 1 AP y la memoria de encuentros previos está vacía.	29
4.2. Caso 2. La terminal móvil sólo detecta 1 AP con un registro de otro AP que interfiere con el AP detectado	30
4.3. Caso 3. La terminal móvil detecta 2 AP al mismo tiempo	31
4.4. Caso 4. La terminal móvil detecta 3 AP al mismo tiempo	31
4.5. Caso 5. La terminal móvil detecta 3 o más AP al mismo tiempo	32
4.6. Pseudocódigo. Algoritmo de selección de canal	33
5. Algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad	35
5.1. Base de datos	36
5.2. Caso 1. La terminal móvil detecta un AP por primera vez y no hay registros de otros AP en la memoria.	36
5.3. Caso 2. La terminal móvil detecta un AP pero tiene un registro de otro AP que interfiere con el AP detectado.	37

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	3
5.4. Caso 3. La terminal móvil detecta 2 AP al mismo tiempo.	38
5.5. Caso 4. La terminal móvil detecta 3 o más AP al mismo tiempo.	39
5.6. Pseudocódigo. Algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad . . .	39
6. Experimentos	41
6.1. Algoritmo de asignación de canal únicamente	42
6.2. Algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad	47
6.3. Ambos algoritmos operando de forma simultánea	52
6.4. Múltiples terminales móviles	54
7. Discusión	57
7.1. Recomendaciones	58
8. Conclusiones	59

Índice de figuras

2.1. Canales de operación de la banda 2.4 GHz [29]	12
2.2. Pila de protocolos estándar 802.11 [5]	14
2.3. Trayectoria de un nodo mediante el modelo <i>random waypoint</i>	16
3.1. Diagrama de estados en Komondor [26]	24
3.2. Diagrama de flujo de simulaciones	26
3.3. Plataforma de simulación	27
4.1. Ejemplo del caso 1 del algoritmo de selección de canal	30
4.2. Ejemplo del caso 2 del algoritmo de selección de canal	30
4.3. Ejemplo del caso 3 del algoritmo de selección de canal	31
4.4. Ejemplo del caso 4 del algoritmo de selección de canal	32
4.5. Ejemplo del caso 5 del algoritmo de selección de canal	32
5.1. Topología utilizada para la base de datos	35
5.2. Ejemplo del caso 1 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad	37
5.3. Ejemplo del caso 2 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad	38
5.4. Ejemplo del caso 3 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad	38
5.5. Ejemplo del caso 4 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad	39
6.1. Separación promedio entre AP por cada escenario simulado	41
6.2. Topologías y experimentos específicos realizados con el algoritmo de asignación de canales para tres densidades.	43
6.3. Comportamiento del <i>throughput</i> de forma individual y promedio para experimentos específicos realizados con el algoritmo de asignación de canales.	45
6.4. Comparativa de desempeño entre algoritmos de asignación de canal	46
6.5. Topologías y experimentos específicos realizados con el algoritmo de potencia y umbral de sensibilidad para tres densidades distintas.	49
6.6. Comportamiento del <i>throughput</i> de forma individual y promedio para experimentos específicos realizados con el algoritmo de potencia y umbral de sensibilidad.	50
6.7. Comparativa de desempeño entre algoritmos de asignación de potencia y umbral de sensibilidad	51
6.8. Comparativa de desempeño de los algoritmos de manera individual y en conjunto .	52
6.9. Comparativa de desempeño de los algoritmos configuraciones default vs aleatorias	53
6.10. Desempeño de ambos algoritmos con múltiples terminales móviles en diferentes densidades	55

Lista de acrónimos

- ANN - Redes neuronales artificiales (*Artifitial neural networks*)
- AoA - Ángulo de llegada (*Angle of arrival*)
- AP - Punto de acceso (*Access Point*)
- BD - *Base de datos*
- BTPA - Balanceamiento TCP y adaptación PCS (*Balanced TCP and PCS adaptation*)
- CSMA-CA - Acceso múltiple por detección de portadora con prevención de colisiones (*Carrier sense multiple access - collision avoidance*)
- CW - Ventana de contención (*Contention window*)
- DCF - Función de coordinación distribuida (*Distributed coordination function*)
- DoE - Dirección de encuentro (*Direction of encounter*)
- DSatur - Grado de saturación (*Degree saturation*)
- DSC - Control dinámico de sensado (*Dynamic sense control*)
- DSSS - Espectro ensanchado por secuencia directa (*Direct sequence spread spectrum*)
- EB - *Exponential backoff*
- ETSI - Instituto europeo de normas de telecomunicaciones (*European telecommunications standards institute*)
- FCC - Comisión federal de comunicaciones (*Federal communications commission*)
- FHSS - Espectro ensanchado por salto de frecuencia (*Frequency hopping spread spectrum*)
- GPS - Sistema de posicionamiento global (*Global positioning system*)
- HCF - Función de coordinación híbrida (*Hybrid coordination function*)
- IEEE - Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Enginners*)
- IFS - Espacio entre tramas (*Inter-frame spaces*)
- ISM - Industriales, científicas y medicas (*industrial, scientific and medical*)
- MAC - Control de acceso al medio (*Medium access control*)
- MIMO - Múltiple entrada múltiple salida (*Multiple input multiple output*)
- MPDU - Unidad de datos de la capa MAC (*MAC layer protocol data unit*)
- MU-MIMO - Multiple usuario MIMO (*Multi user-MIMO*)
- NP - *Nondeterministic polynomial time*

- OFDM - Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal frequency division multiplexing*)
- OFDMA - Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal frequency-division multiple access*)
- OSI - Interconexión de sistemas abiertos (*Open system interconnection*)
- PCF - Función de coordinación de puntos (*Point coordination function*)
- PCSA - Adaptación física de sensado de portadora (*Physical carrier sensing adaptation*)
- PHY - Capa física (*Physical Layer*)
- PLCP - *Physical layer convergence procedure*
- PMD - Dependencia del medio físico (*Physical medium dependent*)
- QAM - Modulación de amplitud por cuadratura (*Quadrature amplitude modulation*)
- SA - Atenuación de señal (*Signal attenuation*)
- TCP - Control de potencia de transmisión (*Transmit power control*)
- TDoA - Diferencia de tiempo de llegada (*Time-difference of arrival*)
- ToA - Tiempo de llegada (*Time of arrival*)
- UIT - Unión internacional de telecomunicaciones

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día las redes de datos se han vuelto una parte primordial de nuestras vidas, debido a que estas se utilizan en diferentes aspectos de nuestras vidas como lo son los ámbitos laboral, educativo o simplemente recreativo por mencionar algunos. Por cuestiones de comodidad y practicidad, las redes inalámbricas de datos son de las más utilizadas. Las características de estas redes fueron presentadas por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) en el año 1997 con el protocolo 802.11 [1], generando así un nuevo tipo de posibilidades más allá de la que proveía la telefonía celular, trayendo consigo su propio tipo de problemáticas. La familia de estándares IEEE 802.11 tiene varias versiones que trabajan en la banda ISM de los 2.4 GHz, la cual está dividida en un total de 14 canales con un ancho de banda de 22 MHz para cada canal [2]. El uso de estos canales depende del organismo regulador de cada país, siendo 11 canales los disponibles dentro de nuestro país. De esos canales destacan 3 debido a su no adyacencia entre ellos, esto quiere decir que están separados totalmente en frecuencia y no presentan interferencia co-canal entre ellos. Regularmente las configuraciones de operación de un AP (canal de operación, potencia de transmisión y el umbral de sensibilidad son asignados de manera independiente sin tomar en cuenta las configuraciones de operación de los dispositivos vecinos.

1.1. Definición del Problema

La presencia de redes inalámbricas con el protocolo 802.11 se ve afectada por la interferencia generada por redes vecinas especialmente en zonas densas, reduciendo su desempeño. En parte por la saturación de los canales de operación disponibles dentro de la banda, sin mencionar que únicamente existen tres canales adyacentes que no generan interferencia mutua. Por esto el asignar de manera adecuada los canales de operación para cada AP se vuelve primordial para obtener la mayor eficiencia de la red estudiada.

Debido a los pocos canales de operación disponibles se han estudiado otras alternativas para disminuir la interferencia co-canal entre vecinos, estos parámetros son la potencia de transmisión y el umbral de sensibilidad, generando lo que denominamos configuración de operación de un AP. El fin de ajustar estos parámetros es reducir las áreas de interferencia permitiendo que los AP operen de manera independiente como si no tuvieran vecinos cercanos. Estos parámetros presentan una problemática, si bien el número de configuraciones distintas de un solo AP es limitado (ver ecuación 1.1), el número de combinaciones posibles diferentes de una red conformada por varios AP crece rápidamente (exponencialmente). Por esto escoger la mejor configuración de operación para cada AP en una red formada por varios AP es un problema complejo, haciendo poco práctico el poder explorar el desempeño de cada una de ellas para encontrar la mejor configuración de cada AP que maximice el desempeño de la red (búsqueda de fuerza bruta).

Combinaciones de un AP = $(\text{canales} * \text{potencias} * \text{umbrales})$ (1.1)

Combinaciones de una red con múltiples AP $= (\text{canales} * \text{potencias} * \text{umbrales})^{AP}$ (1.2)

Las configuraciones posibles de un solo AP se muestran en la Eq. 1.1, donde canales, potencias y umbrales disponibles se refiere al número de canales, potencias y umbrales que puede utilizar cada AP. Si ahora consideramos una red compuesta por varios AP, el número de combinaciones distintas en la red estaría dado por la Eq. 1.2, número que claramente crece de manera exponencial conforme crece el número de AP. Estamos entonces frente a un problema NP, debido a que resulta computacionalmente muy complicado probar todas estas configuraciones una por una para encontrar aquellas que logren el mejor desempeño posible de la red en su conjunto. Por tal motivo se busca implementar una terminal móvil que sea capaz de limitar estos parámetros seleccionando un número determinado de AP para analizar y no toda la red conjunta, reduciendo la complejidad y los recursos computacionales necesarios para el análisis de las configuraciones de operación disponibles.

1.2. Hipótesis

Terminales móviles que atraviesen una red pueden escuchar AP cercanos bajo el estándar 802.11, analizar su configuración actual y proponer a esos AP cambios en sus configuraciones que en su conjunto mejoren el desempeño global de la red. Lo anterior se basa en la premisa que para estimar la mejor configuración de un AP sólo es necesario considerar la configuración/interferencia de AP cercanos, no siendo necesario considerar la totalidad de AP en la red en este proceso.

1.3. Objetivos

Diseñar algoritmos que permitan a una terminal móvil escuchar, analizar y proponer configuraciones de operación a los AP detectados dentro de su rango de cobertura y a lo largo de su trayectoria para mejorar el desempeño global de la red.

1.4. Metodología

Este trabajo fue dividido en tres etapas: la primera etapa se centra en la generación de la plataforma de simulación, la segunda en el desarrollo de un algoritmo de asignación de canal de operación y la tercera en la generación de un algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensado. Estas etapas se detallan a continuación.

Primer Etapa

Esta etapa se centra en la generación de una plataforma de simulación donde se puedan colocar varios AP con sus respectivos clientes en posiciones aleatorias dentro de una red considerando únicamente tráfico *downlink*, debido a que es el tipo de tráfico más común en este tipo de redes. Además, se implementa la funcionalidad de movilidad en algunas terminales que les permita moverse dentro del área de estudio de manera aleatoria o de acuerdo con algún modelo de movilidad durante un tiempo determinado.

Segunda Etapa

Una vez realizada la plataforma de simulación y el recorrido de las terminales móviles, es posible enfocarse en un algoritmo que permita a las terminales móviles asignar el canal de operación de los AP detectados durante su recorrido dentro de la red. El algoritmo propuesto opera en las terminales móviles que analizan los canales de operación presentes en los AP detectados durante

su recorrido y busca reasignar dichos canales de manera que se evite que AP cercanos interfieran entre ellos (utilicen el mismo canal).

Tercera Etapa

Dentro de esta etapa se propone y diseña un segundo algoritmo que permite a la terminal móvil determinar cuál es la mejor configuración de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad para cada AP detectado durante su camino. El algoritmo propuesto se centra en enviar recomendaciones sólo a la pareja de AP más cercanos que operen en el mismo canal y que por lo tanto genera interferencia entre sí. Una vez identificados estos vecinos se estima la distancia entre los dos AP así como la posición del cliente de cada AP. Con esta información la terminal móvil consulta una base de datos que contiene los resultados de una gran cantidad de experimentos, que consideran diferentes distancias entre AP y de cada cliente con su respectivo AP. Para encontrar cuál de los experimentos se asemeja más con las distancias reales de los AP encontrados, y así consultar cual es la mejor configuración para cada uno de los dos AP involucrados.

1.5. Contribución

En este trabajo se proponen dos algoritmos que mejoran el desempeño de una red inalámbrica utilizando un nuevo método basado en el uso de terminales móviles que puedan escuchar a los nodos de la red y enviar recomendaciones con base en los algoritmos planteados.

La eficacia de los algoritmos propuestos fue probada en un simulador de redes inalámbricas y puede servir de base para futuras investigaciones y experimentos, sentando las bases para nuevas técnicas que mejoren el rendimiento de redes inalámbricas centralizadas y distribuidas. Además, este trabajo puede ser implementado de manera práctica (con algunas adecuaciones a los AP de estudio), debido a que no se requiere ningún tipo de cooperación o comunicación entre AP vecinos, incluyendo técnicas capaces de mejorar la comunicación con los AP y clientes y recabar más información de la red de forma práctica.

1.6. Contenido

El contenido de esta tesis está estructurado de la siguiente forma:

- Capítulo 2. Presenta los antecedentes y estado del arte relacionado con el trabajo presentado. Primeramente, se presenta el marco teórico para posteriormente revisar diferentes artículos en la literatura enfocados al problema de asignación de canales o la asignación de potencia y umbral de sensibilidad, así como el uso de terminales móviles en el monitoreo de redes inalámbricas en general.
- Capítulo 3. Se presentan diversas consideraciones para la elaboración del proyecto de tesis, describiendo el funcionamiento de la terminal móvil durante el recorrido realizado en la red.
- Capítulo 4. Presenta el funcionamiento y descripción del algoritmo de asignación de canales de transmisión implementado en la terminal móvil.
- Capítulo 5. Se describe el funcionamiento del algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad implementado en la terminal móvil.
- Capítulo 6. Se presentan diferentes experimentos donde la terminal móvil ejecuta los dos algoritmos propuestos, primero de manera individual y posteriormente de manera conjunta. Se presentan gráficas con los resultados de los experimentos y se comparan con otros algoritmos similares encontrados en la literatura.
- Capítulo 7. Se discuten los resultados obtenidos en los experimentos, resaltando algunos efectos o características que se observaron en el capítulo anterior.

- Capítulo 8. Se presentan las conclusiones generales del trabajo realizado, así como la verificación de la hipótesis planteada en esta tesis.

Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del Arte

2.1. Bandas ISM

Las bandas ISM consisten en bandas de radiofrecuencia reservadas para ser explotadas por aplicaciones del área industrial, científico o médica, sin necesidad de una licencia de operación. Debido a este hecho los dispositivos que operen en dichas bandas deben ser tolerantes a interferencias y errores generados por 'la operación' de otros dispositivos.

Estas bandas se encuentran definidas en el artículo 5 del reglamento de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) [2]. Inicialmente, la aplicación de estas bandas se pensó para fines industriales, científicos, domésticos o similares, excluyendo las telecomunicaciones. Sin embargo, debido a la gran congestión del espectro radioeléctrico y la falta de uso de licencia de estas bandas, provocó su explotación culminando en que las bandas de los 2.4 GHz y los 5 GHz sean las principales bandas de operación para el estándar 802.11.

2.2. Estándar IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 es una familia de protocolos de comunicación inalámbrica de área local normalizado por la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) que tomó popularidad a partir del año 2000 [1], también conocido como WiFi. En la actualidad redes inalámbricas bajo el estándar 802.11 forman una de las principales formas de comunicación inalámbrica mediante puntos de acceso para diferentes dispositivos compatibles con dicha tecnología como teléfonos inteligentes, laptops, televisores inteligentes, etcétera .

El funcionamiento del estándar 802.11 se centra en la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) pertenecientes al modelo OSI [3].

Una de las principales bandas de operación para este estándar es la banda ISM de los 2.4 GHz administrando su ancho de banda y generando un total de 14 canales con un ancho de banda de 22 MHz por cada canal para transmitir mostrados en la figura 2.1. Cabe resaltar que el uso de estos canales depende de la regulación del espectro radioeléctrico de cada país, ya que la FCC (*Federal Communications Commission*) permite el uso de 11 canales, mientras que la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) permite utilizar 13 canales.

Con el paso del tiempo se han desarrollado diferentes versiones del protocolo 802.11, a continuación, se presentan brevemente las características principales de cada versión [1], [4].

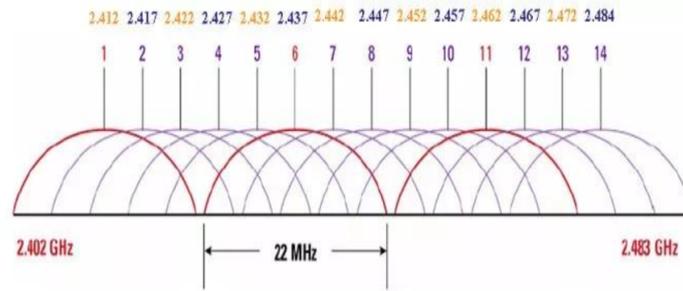


Figura 2.1: Canales de operación de la banda 2.4 GHz [29]

802.11 Original

Publicada en el año 1997 alcanzaba velocidades de 1 y 2 Mbps, operando en la banda de los 2.4 GHz. Transmitía mediante señales infrarrojas y con señales moduladas con FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) y DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). El estándar 802.11 usa el protocolo CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance*) para reducir las colisiones entre terminales. Esta versión del protocolo 802.11 presentaba diversas problemáticas de interoperabilidad entre equipos, actualmente se considera obsoleto.

802.11a

Publicado en el año 1999 logrando alcanzar velocidades desde 6 hasta 54 Mbps dependiendo el tipo de modulación utilizada. Opera en la banda de los 5 GHz la cual posee mayor tasa de transmisión, pero una menor distancia de cobertura, además de utilizar canales de 20 MHz. Implementa el uso de la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

802.11b

Publicado en el año 1999 alcanzando velocidades desde 1 hasta 11 Mbps dependiendo de su modulación. Operando en la banda 2.4 GHz. Utiliza la técnica DSSS.

802.11g

Publicado en el año 2003 alcanzaba velocidades desde los 6 a los 54 Mbps operando con canales de 20 MHz en la banda de 2.4 GHz. Utiliza la modulación OFDM teniendo retrocompatibilidad con la versión 802.11b.

802.11n

Publicado en el año 2009 alcanzando diferentes velocidades siendo la máxima teórica de 150 y hasta 600 Mbps. Opera en la banda de los 2.4 GHz y 5 GHz con canales simples de 20 Mbps y compuestos de 40 Mbps. Es compatible con las versiones anteriores a, b y g. Implementa la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) que utiliza varias antenas para transmitir y recibir generando mejores tasas de transmisión y calidad de la señal.

802.11ac

Publicado en el año 2014 alcanza velocidades de 433 Mbps y 1.3 Gbps. Operando en la banda de los 5 GHz con canales de hasta 160 MHz. Presenta una compatibilidad con la versión g. Utiliza la técnica de MU-MIMO (*Multi User-MIMO*) y modulaciones de alta densidad como 256 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

802.11ax Wifi 6

Esta es la última versión puede alcanzar velocidades de hasta 10 Gbps, operando en las bandas de los 2.4 GHz y 5 GHz, teniendo una ampliación del uso del espectro hasta los 6 GHz. Opera con técnicas de modulación OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) acompañado de MU-MIMO.

2.3. Capa PHY

El funcionamiento del estándar 802.11 se centra en la capa física principalmente, la cual se encarga de transmitir los bits de información mediante diferentes tecnologías por un medio inalámbrico.

Esta capa puede dividirse en dos subcapas.

La subcapa PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*) [5] se encarga de adaptar los MPDU (*MAC Layer Protocol Data Unit*), a las características del medio de transmisión mediante tramas que sean susceptibles a ser transmitidas o recibidas entre estaciones.

La subcapa PMD (*Physical Medium Dependent*) tiene como función definir el método de transmisión y recepción que se utilizará para enviar la información entre dos estaciones o nodos.

Además, existe la capa de gestión, en la cual es posible definir variables de gestión, atributos, notificaciones y acciones requeridas para gestionar una estación operativa.

2.4. Capa MAC

La capa MAC (*Medium Access Protocol*) es otra subcapa del modelo OSI, ubicada por encima de la capa PHY. Esta capa esta encargada de gestionar la sincronización y sistemas de distribución, determinando el momento adecuado para poder transmitir y/o recibir datos a través de un medio desocupado.

La capa MAC cuenta con un sistema de coordinación denominado DCF (*Distributed Coordination Function*) [5], que trabaja con CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance*) el cual coordina el uso del medio de transmisión asegurándose de transmitir únicamente cuando el medio se encuentre disponible (libre). Si el AP encuentra el medio libre espera un tiempo denominado IFS (*Inter-frame Spaces*). En el caso contrario (canal ocupado) se utiliza el algoritmo de *Exponential Backoff* el cual asigna un tiempo (*slot time*) aleatorio de espera según sea la ventana de contención (CW) que tiene como objetivo disminuir la probabilidad de generar colisiones. Una vez finalizado el tiempo de espera la terminal móvil vuelve a revisar el medio para transmitir en caso de estar desocupado, o en caso contrario volver a utilizar un *exponential backoff* con una ventana de contención mayor.

Otro sistema utilizado es el PCF (*Point Coordination Function*) que es utilizada en transmisiones libres de contienda por el AP para servicios síncronos que no toleran la generación de retardos

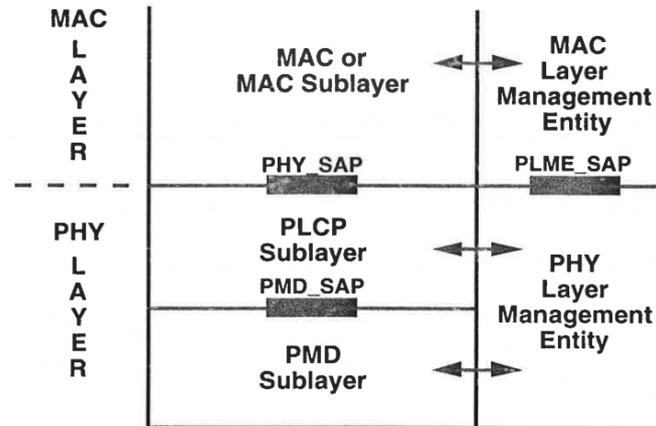


Figura 2.2: Pila de protocolos estándar 802.11 [5]

aleatorios. Este tipo de servicios suele estar administrado por una estación central capaz de administrar el envío de tramas.

Los servicios ya mencionados son capaces de operar de manera conjunta ya que el comportamiento de ambos es transparente para las estaciones. Este sistema es denominado como HCF (*Hybrid Coordination Function*).

2.5. Algoritmos de selección de canal

En la literatura existen varios algoritmos de selección de canal. Muchos de ellos están basados en una técnica llamada de colores (canales), donde se evita que nodos vecinos usen el mismo color (canal), eliminando de esta forma la interferencia entre ellos. La ventaja de esta técnica es que puede representarse una red inalámbrica mediante grafos, representando cada nodo mediante un vértice y su conexión con sus vecinos mediante aristas, de esta manera se observa de manera sencilla la comunicación entre vecinos en la red y facilitando su análisis.

Dentro de las matemáticas existe una rama conocida como teoría de grafos, donde un grafo se define como un conjunto de vértices interconectados por un conjunto de aristas $G = (V, E)$ [6].

Una de las problemáticas estudiadas con los grafos consiste en la coloración de estos, que consiste en asignarle un color a cada vértice evitando la duplicación de colores con sus vecinos directos dando como resultado el número cromático del grafo, el cual indica el número mínimo de colores que requiere el grafo. El uso de técnicas de coloración de grafos se aplica en el mundo real en distintas aplicaciones. Una de ellas es la asignación de canales de operación para redes inalámbricas, ya que, al tener un espectro limitado, se busca que las redes optimicen este recurso, generando la menor interferencia posible con redes aledañas. Estos algoritmos suelen utilizarse para cambiar los canales de operación de la red, es decir, cambiar la configuración de operación. Este tipo de técnicas representan una alternativa para mejorar el desempeño de la red.

Con el paso del tiempo se han presentado distintas técnicas con el fin de solucionar este problema y asignar un color diferente para cada nodo. A continuación, presentamos algunos de los denominados algoritmos de coloración más comunes en la literatura.

Algoritmo Greedy

Este es un algoritmo simple pero bastante importante en la coloración de grafos. Su funcionamiento consiste en asignar el primer color disponible a cada vértice perteneciente al grafo, siguiendo un orden que puede ser aleatorio o no [6]. Algoritmo 1 muestra su funcionamiento.

Algorithm 1 GREEDY ($S \leftarrow 0, \pi$) **for** $i \leftarrow 1$ **to** $|\pi|$ **do**

```

for  $j \leftarrow 1$  to  $|S|$  do
  if  $(S_j \cup \{\pi_i\})$  es un conjunto independiente then  $S_i \leftarrow$ 
     $S_j \cup \{\pi_i\}$  break  else
     $j \leftarrow j + 1$ 
  end if
end for
if  $j > |S|$  then  $S_j \leftarrow \{\pi_i\}$ 
   $S \leftarrow S \cup S_j$ 
end if
end for

```

Este algoritmo presenta soluciones prácticas factibles, aunque estas pueden no ser las más óptimas acorde al número cromático del grafo.

Algoritmo DSATUR

Este algoritmo fue propuesto por Brélaz en 1979 siendo la abreviación de *Degree Saturation* [6], y tiene un comportamiento similar al algoritmo *greedy*. Toma en cuenta la categorización de los vértices previos al coloreado según sea el grado de saturación de estos, es decir, se le da prioridad a los vértices que posean un mayor número de aristas. El algoritmo 2 presenta su funcionamiento.

Algorithm 2 DSatur ($S \leftarrow 0, X \leftarrow V$)

```

while  $X \neq 0$  do
  Choose  $v \in X$ 
  for  $j \leftarrow 1$  to  $|S|$  do
    if  $(S_j \cup \{v\})$  es un conjunto independiente then
       $S_j \leftarrow S_j \cup \{v\}$ 
      break
    else
       $j \leftarrow j + 1$ 
    end if
  end for
  if  $j > |S|$  then
     $S_j \leftarrow \{v\}$ 
     $S \leftarrow S \cup S_j$ 
  end if
   $X \leftarrow X - \{v\}$ 
end while

```

El asignar un orden de coloración para los vértices genera un comportamiento más predecible para el algoritmo, así como la reducción de colores necesarios para el grafo, entregando soluciones más eficientes.

2.6. Modelos de movilidad

En esta tesis se plantea el uso de terminales móviles para analizar la configuración existente de AP y proponer cambios a dichas configuraciones mientras terminales móviles se desplazan por la red. En este sentido es importante definir la forma en que las terminales definen su trayectoria y velocidad de movimiento dentro del área de la red.

Los modelos de movilidad buscan simular el recorrido de una persona, auto, o algún otro dispositivo en diferentes entornos durante un periodo de tiempo determinado. Existen dos tipos de modelos de movilidad, aquellos en los que el movimiento del nodo no depende del movimiento de los demás nodos, es decir es independiente, y aquellos en el cual el movimiento del nodo se ve afectado por el movimiento de los demás nodos y también por las características del escenario de simulación.

Random Waypoint

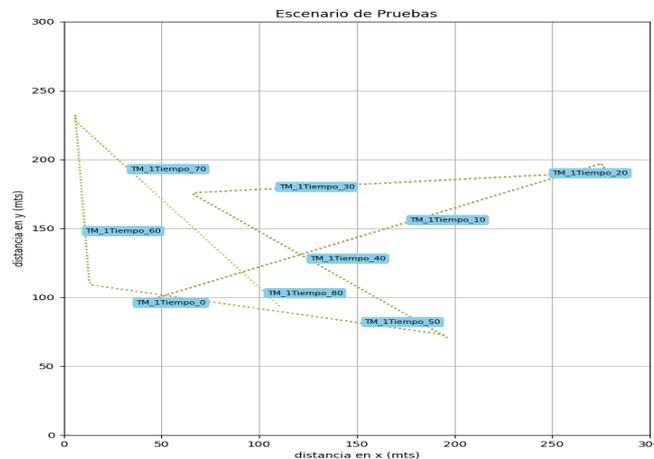


Figura 2.3: Trayectoria de un nodo mediante el modelo *random waypoint*

En este trabajo de tesis se usó el modelo de movilidad *random waypoint* debido a su simpleza de implementación y a que es uno de los modelos más utilizados en la literatura. En este modelo se busca que el nodo realice un recorrido en línea recta desde un punto de la red hacia otro punto que se escoge con posición aleatoria y con un tiempo de espera entre la asignación de cada nuevo punto de destino. Durante el recorrido realizado el nodo se mueve con una velocidad uniforme.

2.7. Métodos de localización de nodos en redes inalámbricas

Una parte importante de este trabajo requiere estimar la posición de los AP y sus clientes para que la terminal móvil pueda calcular cual es la mejor configuración de los AP detectados en su camino. Existen diferentes técnicas en la literatura utilizadas con el fin de determinar la posición de un nodo. Estas técnicas pueden requerir de una infraestructura especial, acceso a internet y/o a servicios de geolocalización. Para solucionar este problema han surgido diferentes técnicas que podemos dividir en cuatro categorías [22].

ToA (*Time of Arrival*). Trabaja con retardo generado por la propagación de la señal hasta el receptor del radio enlace.

TDoA (*Time-Difference of Arrival*). Opera con la diferencia entre tiempos de recepción de la señal de tres o más receptores.

AoA (*Angle of Arrival*). Este método requiere de receptores especiales, los cuales permiten determinar el ángulo de llegada de la señal transmitida.

SA (*Signal Attenuation*). Mediante modelos de propagación se determina la distancia entre transmisor y receptor y usando varios transmisores es capaz de triangular la posición de un nodo.

2.8. DoE (*Direction of Encounter*)

Es una técnica de localización de nodos capaz de estimar la posición de nodos pertenecientes a una red inalámbrica mediante un nodo móvil que realiza un recorrido en el área de interés [22].

DoE opera con la información recabada por un nodo móvil, el cual va detectando el tráfico enviado por los nodos de la red inalámbrica, guardando el punto de la primer y última detección. Asumiendo que el rango de cobertura consiste en un círculo perfecto, se puede conocer la posición de los nodos que detecta la terminal móvil. De las posiciones obtenidas una es la posición real y otra su posición espejo. Esta posición espejo puede descartarse estimando la distancia mínima entre otros nodos, rotando las constelaciones formadas entre los nodos detectados previamente.

En este sentido, de las técnicas propuestas anteriormente consideramos que DoE sería una forma natural y viable para que las terminales móviles estimen la posición de los AP en el área de interés. En este trabajo, sin embargo, no se implementó propiamente ninguna de estas técnicas y se asumió que la terminal móvil conoce la posición de un AP y su cliente al momento que entra dentro de su rango de transmisión. Lo anterior se decidió en gran medida para concentrar este trabajo en el comportamiento de los algoritmos de selección de canal y selección de potencia de transmisión y umbral de sensado, mas no en la implementación de un sistema de localización de nodos, dejando fuera de los resultados obtenidos los errores de localización que dichos sistemas generan.

2.9. Estado del Arte

Como parte del desarrollo de esta tesis se revisaron diferentes artículos relacionados al panorama actual sobre el tema de investigación y poder así determinar una base de comparación con los algoritmos presentados en este trabajo. Para este fin dividimos el estado del arte en tres áreas principales, una enfocada hacia la selección de canales de transmisión, otra enfocada hacia la reutilización espacial o la asignación de la potencia de transmisión y el umbral de sensibilidad de los AP y, finalmente, trabajos referentes al uso de terminales móviles en redes inalámbricas con el propósito de mejorar algún parámetro u obtener información de la propia red en general.

Técnicas de Selección de canal

Este tema ha sido investigado de manera constante en redes inalámbricas debido a que el espectro asignado al uso de estas redes es limitado y, si bien ya comienza a utilizarse la banda de 5 GHz, ampliando el número de canales disponibles, sigue siendo un recurso reducido en comparación con el incremento de usuarios conectados en la red.

La forma tradicional de abordar el problema de como asignar canales a nodos de la red sigue siendo mediante algoritmos de coloración, los cuales siguen utilizando variaciones de algoritmos sencillos presentados hace bastantes años como el algoritmo DSATUR [8]. Por ejemplo, [9] utiliza el algoritmo DSATUR con ciertas modificaciones en cuanto a los recursos dado que solamente utiliza tres canales ortogonales en la banda de los 2.4 GHz. Este trabajo analiza la posibilidad de tener una mejor operación con canales que presenten una leve interferencia entre sí, implementando una función que analiza el desempeño de la red teniendo interferencia intercanal y posteriormente entregando el número de canales o colores disponibles al algoritmo para que trabaje de manera

normal. Otro ejemplo es en [10], donde se realizan cambios directos al algoritmo DSATUR al dividir el grafo de estudio en diferentes subgrafos, categorizándolos en base a los nodos más saturados. Posteriormente, este algoritmo analiza el número de canales disponibles que pueden ser asignados lo cual mejora la administración de los recursos disponibles disminuyendo el uso de colores necesarios para colorear el grafo en estudio.

Dentro de la literatura encontramos otro tipo de técnicas enfocadas al uso de todos los canales disponibles (ortogonales o no), tratando de optimizar el desempeño de la red aún con la interferencia generada. Como se mencionó anteriormente en [9], en [11] se presentan una evaluación del uso de todos los canales dependiendo de la cantidad de tráfico que genera cada nodo en gestión. Este trabajo presenta simulaciones y compara los resultados en diferentes grafos con configuraciones aleatorias y diferente número de canales activos.

En [12] los autores utilizan técnicas de aprendizaje por reforzamiento centrando su operación en redes de grafos convolucionales saturados y con soluciones precargadas mediante un buffer de memoria. Ya en operación el sistema revisa si conoce algún caso similar, de ser así procede a tomar decisiones y asignar los canales de operación basado en datos previos. En [7] los autores consideran las distancias existentes entre los vecinos más cercanos, ya que demuestran que son estos los que generan la mayor interferencia entre sí. Al operar sólo con subconjuntos de nodos vecinos, este algoritmo puede asignar canales ortogonales distintos a un nodo y a sus vecinos más cercanos.

En cuanto a las técnicas mencionadas en la literatura se destaca que la mayoría corresponden a algoritmos o procesos centralizados. Es decir, todos los AP pertenecientes a la red deben ser administrados por un elemento central o administrador que asigne los canales de operación para cada nodo. Un trabajo que difiere de esta forma de operar es [13], ya que presenta un algoritmo descentralizado el cual se implementa en cada AP que conforme la red. Este trabajo analiza y sensa cada canal disponible (no opera con canales ortogonales) y mediante el análisis de probabilidades el AP es capaz de determinar el canal óptimo de operación sin influir en la gestión de los nodos vecinos.

Técnicas de reutilización espacial

El termino de reutilización espacial se basa en disminuir los rangos de interferencia entre los AP de la red que incluye la administración de parámetros como la potencia de transmisión, el umbral de sensibilidad y el canal de operación. La asignación de canales ya se analizó en el punto anterior, por lo que los trabajos presentados a continuación se centran en los otros dos factores.

Entre los trabajos encontrados tenemos a [14], donde los autores presentan un algoritmo distribuido donde cada nodo de la red transmite beacons a otros nodos que se encuentren en el mismo canal. Este trabajo analiza la utilización de canal en cuanto al tráfico generado por cada uno de los nodos para posteriormente homogenizar las potencias de transmisión, con las que opera cada nodo y asignar las potencias que proporcionen una transmisión óptima dependiendo del retardo presentado y el número de nodos que tiene cada AP. En [15], los autores analizan elementos recién implementados en el protocolo 802.11 ax, los cuales facilitan la asignación de potencias (*TCP-Transmit Power Control*) y umbrales de sensibilidad (*PCSA-Physical Carrier Sensing Adaptation*) para los AP, así como la mezcla de estas técnicas (*BTPA-Balanced TCP and PCS Adaptation*). Todo esto implementado mediante redes ANN (*Artificial Neural Networks*), que corresponden a redes adaptativas capaces de mejorar su desempeño mediante las técnicas mencionadas en el estándar 802.11ax. En [16] y [17] los autores analizan las técnicas de reutilización espacial y de control de sensibilidad dinámica (DSC) implementados en redes centralizadas aprovechando las nuevas técnicas incluidas en el protocolo 802.11 ax.

Finalmente, en [18] los autores muestran módulos implementados en el simulador de eventos discretos Komondor [27], generando experimentos orientados a la reutilización espacial basándose en dos módulos de operación. El primero se centra en la asignación de canales de operación y posteriormente con las redes que continúen generando interferencia co-canal define grupos de

reutilización asignando niveles de potencia y umbral de sensibilidad. En [7], los autores acotan la asignación de potencias y umbrales de sensibilidad a cuatro posibles configuraciones de operación. Este trabajo establece la potencia y umbral de sensado de un nodo considerando únicamente a la presencia de sus vecinos más cercanos. En el primer caso un AP sólo considera a su vecino más cercano (algoritmo single), o dos vecinos más cercanos (algoritmo tercias). En ambos casos se hace una búsqueda exhaustiva de todas las posibles combinaciones de configuraciones posibles para encontrar la mejor configuración para cada nodo (single o tercias). El objetivo es disminuir el número de simulaciones necesarias para determinar la mejor configuración de cada nodo. Este par de trabajos han sido ampliamente estudiados dentro de nuestro proyecto ya que también utilizan el simulador Komondor usado en este trabajo y consideran también cuatro configuraciones posibles para cada nodo.

Uso de terminales móviles

Finalmente, existen trabajos orientados al uso de terminales móviles para el análisis o mejoramiento del funcionamiento de redes inalámbricas. Si bien estos trabajos no buscan afectar la configuración de los nodos en la red, si realizan otro tipo de funciones y sobre todo su funcionamiento se centra en el uso de un elemento móvil. Además, se revisaron otro tipo de técnicas enfocadas a determinar la posición de AP y clientes de la red que hagan uso de terminales móviles, sin necesidad del uso de GPS. Esto resulta necesario para poder obtener la posición de los nodos de la red que pueda ser usada por los algoritmos propuestos en este trabajo.

Los artículos [19], [20], [21] y [22] presentan técnicas que permiten encontrar un nodo entre los varios nodos que conforman la red. En [19], los autores desarrollaron una técnica denominada FRESH, la cual es capaz de encontrar nodos pertenecientes a una red Ad hoc considerando la edad (antigüedad) de los paquetes generados durante transmisiones previas a dichos nodos. Con esta información es posible generar una inundación (*flooding*) de mensajes de búsqueda enfocado a subáreas de la red donde los nodos tengan un recuerdo más reciente del nodo buscado. En [20], los autores presentan MARS, el cual tiene un funcionamiento bastante similar a FRESH [19], pero que toma en cuenta nodos estáticos y nodos móviles. En [21], los autores estudiaron el impacto de la movilidad de los nodos de una red Ad hoc mediante técnicas capaces de determinar la relación espacio temporal de los nodos detectados. Siendo capaces de determinar la ruta que mantienen los nodos, así como la velocidad promedio con la que se mueven. Por último, en [22], los autores se enfocan en obtener la posición relativa de un nodo mediante una terminal móvil. Su funcionamiento se centra en estimar el primer y último punto de encuentro entre una terminal móvil y un nodo estático que se encuentre en su camino. Posteriormente, mediante cálculos algebraicos se estima la posición relativa del nodo estático, superponiendo la posición de otros nodos detectados con el fin de eliminar posiciones espejo.

Los trabajos [23], [24] y [25] se enfocan en el uso de nodos móviles con el fin de poder escuchar la red y analizarla proponiendo algunas técnicas o plataformas que faciliten estos procesos. En [23], los autores proponen una técnica denominada CANSAS, la cual denominan como un *pocket sniffer* que recolecta los paquetes que va escuchando una terminal móvil durante su recorrido para un posterior análisis de los datos recolectados. Esta es una herramienta pensada a futuro, ya que si bien, es posible su implementación requiere revisar la compatibilidad con clientes y temas de seguridad referente a las conexiones inalámbricas entre diferentes AP. En [24], los autores desarrollaron un trabajo similar siendo la implementación del *pocket sniffer* en un entorno real mediante un *smarthphone* realizando experimentos con diferentes redes inalámbricas. Por último, en [25], los autores presentan una plataforma llamada *SpecSense* donde se monitorea el uso del espectro radioeléctrico en un área de estudio mediante interpolación de señales.

En los trabajos presentados anteriormente se observa un panorama enfocado al uso de terminales móviles centrado en analizar la red y/o el uso de esta, proporcionando herramientas o técnicas para su monitoreo. Sin embargo, estas herramientas son pasivas, pues no permiten la interacción entre terminales móviles y nodos estáticos en su camino. Esto último resulta comprensible debido

a los términos de seguridad y acceso. Por todo lo anterior consideramos que la idea central de este trabajo que consiste en el uso de terminales móviles interactuando directamente con otros nodos de la red es una idea novedosa que aún no ha sido implementada o explotada del todo.

Capítulo 3

Consideraciones generales de los algoritmos propuestos

3.1. Consideraciones Generales

Para el desarrollo de este proyecto se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.

1. Tanto los AP como los clientes mantienen una posición fija durante todo el tiempo de simulación. El único elemento que se mueve es la terminal móvil.
2. La terminal móvil es un elemento pasivo dentro de la red, es decir no interfiere en los datos enviados entre los AP y sus clientes, únicamente escucha paquetes de datos y control. Ocasionalmente la terminal móvil envía un paquete de control con recomendaciones de configuración a sus AP vecinos. Estas recomendaciones pudieran ser enviadas en modo *broadcast* por lo que no sería necesario una conexión previa.
3. La terminal móvil, de acuerdo con los algoritmos que se proponen en este trabajo y que serán definidos en la siguiente sección, envía recomendaciones de configuración (canal de operación, potencia de transmisión y umbral de sensibilidad) a todos o algunos AP que escucha en su camino. Sin embargo, la decisión final de realizar algún cambio de configuración recae en cada AP como se explicará más adelante.
4. Los AP comparten información de su operación, (canal de operación, potencia de transmisión y umbral de sensibilidad) periódicamente a través del envío de paquetes de control en modo *broadcast* y sin ningún tipo de encriptación. La terminal móvil puede comunicarse con los AP de la misma forma (paquetes broadcast) para proponerles cambios de configuración.
5. Los AP, sus clientes y la terminal móvil cuentan con GPS o algún medio de localización que permita establecer su posición. Los clientes envían su posición a su AP, y estos a su vez comparten tanto su posición como la de su cliente con la terminal móvil mediante el envío de paquetes *broadcast* que se transmiten de manera periódica junto con la configuración del AP.
6. La única métrica de desempeño considera el *throughput* promedio generado por todos los nodos (AP) de la red estudiada.
7. Se considera la presencia de un único cliente conectado a cada AP y sólo se considera tráfico downlink.

Si bien algunas de estas consideraciones pareciesen ideales, han servido como base para desarrollar el estudio de la red y con ello centrar los experimentos en probar el desempeño de nuestros algoritmos.

3.2. Modelo de propagación

Como ya se ha mencionado, este proyecto utilizó el simulador de redes inalámbricas Komondor. La selección de este simulador se debe a que permite obtener el *throughput* obtenido por cada AP de manera rápida pues no simula la transmisión de paquetes individuales, sólo el *throughput* de cada nodo en estado estable. Dentro de Komondor se tienen disponibles diferentes modelos de propagación para la realización de experimentos. En este trabajo se eligió el modelo *indoor 2* para propagación de señales en interiores, debido a que caracteriza un escenario más realista para redes inalámbricas en zonas urbanas. Este modelo se expresa por la ecuación (3.1) representando las pérdidas que sufre la señal (L_{indoor}) entre transmisor y receptor. PL_f representa el factor de pérdida de trayectoria, α es una constante dependiente del modelo de propagación, d es la distancia en metros entre el nodo transmisor y el nodo receptor, h_s es un factor de sombra, f_w corresponde a la distancia de separación entre los muros y finalmente h_0 es un factor de obstáculos.

$$L_{indoor} = PL_f + 10\alpha \log_{10}(d) + h_s + \left(\frac{d}{f_w}\right) h_0 \quad (3.1)$$

3.3. Configuraciones de operación

Como ya se ha mencionado anteriormente, las múltiples combinaciones de canales de operación, potencias de transmisión y umbrales de sensibilidad generan un problema NP debido a que el número de combinaciones posibles en una red formada por varios AP crecen de manera exponencial conforme aumenta el número de AP. Por lo anterior se acotaron los posibles valores que pueden tomar los parámetros que determinan la configuración de cada AP resultando en el uso de 3 canales de transmisión (se asumen ortogonales). En cuanto a la potencia de transmisión y umbral de sensibilidad se establecieron 2 posibles opciones, alto y bajo para cada uno. Estas configuraciones se presentaron en [7], [18].

Canales de operación

- 1, 6 y 11 (canales ortogonales en la banda ISM de 2.4 GHz)

Potencias de transmisión

- Alta: 20 dBm
- Baja: 5 dBm

Umbrales de sensibilidad

- Alto: -68 dBm
- Bajo: -90 dBm

Las potencias de transmisión y los umbrales de sensibilidad fueron agrupadas y catalogadas en ciertas configuraciones de operación las cuales pueden ser asignadas a cada AP.

Configuraciones de operación

Configuración 1: *Potencia alta: 20 dBm, Umbral bajo: -90 dBm*

Configuración 2: *Potencia alta: 20 dBm, Umbral alto: -68 dBm*

Configuración 3: *Potencia baja: 5 dBm, Umbral bajo: -90 dBm*

Configuración 4: *Potencia baja: 5 dBm, Umbral alto: -68 dBm*

Una vez establecidas las variables de operación para el proyecto podemos retomar la ecuación (1.1) para generar la ecuación (3.3), tomando en cuenta los canales de operación y las posibles configuraciones de operación con las que puede operar cada AP que conforman la red.

$$Combinaciones_{porAP} = (3_{canales} * 4_{configuraciones}) = (12) \quad (3.2)$$

$$Combinaciones_{delared} = (3_{canales} * 4_{configuraciones})^{AP} = (12)^{AP} \quad (3.3)$$

AP	Canales	Configuraciones de potencia y umbral	Combinaciones globales
1	3	4	12
2	3	4	144
3	3	4	1,728
4	3	4	20,736
5	3	4	248,832
6	3	4	$2,985x10^6$
7	3	4	$35,831x10^6$
8	3	4	$429,981x10^6$
9	3	4	$5,159x10^9$
10	3	4	$61,917x10^9$

Cuadro 3.1: Configuraciones globales (tomando en cuenta el canal, potencia de transmisión y umbral de sensibilidad) disponibles en la red.

En la Tabla 3.1 es posible observar el número de configuraciones posibles para un número diferente de AP. Como se puede observar en la tabla el número de combinaciones presenta un crecimiento exponencial, generando miles de configuraciones aún para redes con pocos AP. Como se mencionó anteriormente, solamente una o algunas de estas configuraciones entregan el mejor desempeño de la red.

3.4. Densidad de la red

La densidad de AP en el área de estudio es un parámetro muy importante debido a que determina el grado de interferencia entre los AP presentes. En este trabajo más que el número de AP por unidad de área se utilizó la distancia promedio entre AP como parámetro indicativo de la densidad del escenario de estudio. Dicha distancia define entonces que tan cerca o lejos se encuentran los AP que conforman la red. En este trabajo definimos la distancia promedio como la distancia euclidiana promedio entre todos los AP presentes en el área de estudio. De este modo distancias promedio reducidas generan una mayor interferencia entre AP mientras que distancias mayores disminuyen o eliminan la interferencia generada con los nodos vecinos.

3.5. Throughput promedio

El throughput promedio generado por la red será nuestra métrica de desempeño para analizar los resultados de los experimentos. El throughput promedio consta de la media aritmética compuesta por el throughput de cada AP que conforma la red, representada por la ecuación (3.4). Donde n es el número de AP que conforman la red, γ_i es el *throughput* generado por el AP_i y $\bar{\gamma}$ corresponde a throughput promedio de la red.

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (3.4)$$

En una primera instancia se obtendrá el *throughput* obtenido por la red original sin generar cambio alguno. Posteriormente se estudiará el *throughput* después de aplicar los cambios de configuración generados por los algoritmos propuestos.

3.6. Simulador Komondor

Komondor es un simulador de eventos discretos de redes inalámbricas de alta densidad basadas en el estándar 802.11. Se trata de un simulador de código abierto, basado en la librería COST que utiliza el lenguaje de programación C++ [26]. El objetivo del simulador es brindar otra opción de desarrollo para trabajos centrados en el estándar 802.11 siendo compatible con la versión más reciente 802.11ax, facilitando la implementación de técnicas de *machine learning* por parte del usuario.

A diferencia de otros simuladores de redes que consideran el envío de paquetes capa por capa del modelo OSI, *Komondor* centra sus simulaciones en la capa PHY, reduciendo el procesamiento requerido para simulaciones con una gran densidad de nodos. En Komondor se definen diferentes estados en los cuales puede encontrarse un nodo (sensando, transmisión, recepción, en espera y NAV) con los cuales genera una cadena de Markov que busca obtener el throughput neto de la red simulada cuando el envío de paquetes llega a un estado estable. Además de obtener otro tipo de parámetros como el número de paquetes enviados exitosamente, entre otros.

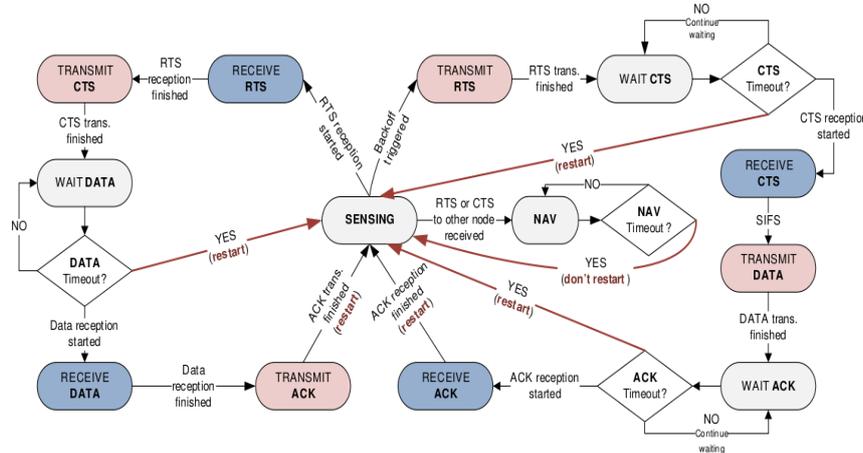


Figura 3.1: Diagrama de estados en Komondor [26]

El objetivo de Komondor es que el usuario pueda obtener el throughput generado por la red de una manera más sencilla y rápida. Este simulador ha sido comparado con ns-2, ns-3, OMNET++, OPNET entre otros, entregando resultados y un desempeño bastante similar, corroborando su fiabilidad. Además de ser compatible con el protocolo 802.11ax, característica que a excepción de ns-3 no poseen los demás simuladores, más sencillo de utilizar y manipular por el usuario.

La Figura 3.1 muestra un diagrama de todos los posibles estados de un nodo en Komondor, inicializando con el sensado del canal. Estos estados permiten tener un control de todas las fases de la simulación y generar *logs* de salida correctos. Esto permite establecer de manera precisa los tiempos de envío de las tramas generadas durante la simulación y así establecer el comportamiento que cada nodo debe tener para una determinada situación.

3.7. Simulación

A continuación, se explicará la metodología utilizada para generar los experimentos. La Figura 3.2 muestra un diagrama de flujo del desarrollo de las simulaciones utilizadas en los experimentos propuestos.

La estrategia abordada para mejorar el desempeño de la red consistió en dividir el problema en dos partes. Primero se desarrollará un algoritmo encargado de asignar los canales de operación para cada AP. Posteriormente, se propondrá un algoritmo encargado de asignar la potencia de transmisión y umbral de sensibilidad a alguno o varios de los AP que visita la terminal móvil. La efectividad del uso de estos dos algoritmos se probará primeramente de manera individual, y posteriormente la terminal aplicará ambos algoritmos de manera simultánea durante su recorrido. En ambos casos la terminal móvil envía sus recomendaciones de configuración a los AP detectados con paquetes en modo *broadcast*.

Partir el problema en dos partes que se puedan aplicar de manera serial (primero el algoritmo de selección de canal seguido del algoritmo de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad) reduce de manera importante la cantidad de combinaciones diferentes de la red como se puede ver en la Tabla 3.2.

AP	Canales	Configuraciones de operación (potencia y umbral)	Combinaciones sólo de canal (A)	Combinaciones sólo potencia y umbral (B)	Combinaciones totales en la red considerando los dos algoritmos en forma serial (A+B)
1	3	4	3	4	7
2	3	4	9	16	25
3	3	4	27	64	91
4	3	4	81	256	337
5	3	4	243	1,024	1267
6	3	4	729	4,096	4825
7	3	4	2,187	16,384	18,571
8	3	4	6,561	65,536	72,097
9	3	4	19,683	262,144	281,827
10	3	4	59,049	$1,048x10^3$	$1,107x10^3$

Cuadro 3.2: Número de combinaciones posibles generadas.

AP	Canales	Configuraciones de operación	Combinaciones de canal que explora la TM, con una pareja de AP a la vez (C)	Combinaciones de potencia y umbral que explora la TM, con una pareja de AP a la vez (D)	Combinaciones que explora la TM, una pareja a la vez (C+D)
1	3	4	3	4	7
2	3	4	9	16	25
3	3	4	9	16	25
4	3	4	9	16	25
5	3	4	9	16	25
6	3	4	9	16	25
7	3	4	9	16	25
8	3	4	9	16	25
9	3	4	9	16	25
10	3	4	9	16	25

Cuadro 3.3: Número de combinaciones posibles generadas considerando sólo la pareja de vecinos más cercanos entre ellos a la vez.

Como se puede observar en la Tabla dividir el problema en dos fases reduce de manera sig-

nificativa el número de combinaciones diferentes en la red, lo cual reduce de manera importante el espacio de búsqueda de los dos algoritmos propuestos. Sin embargo, es importante mencionar que esta estrategia conlleva el riesgo que la solución encontrada por los dos algoritmos propuestos operando de manera serial no sea la mejor posible comparada con un algoritmo que considere todo el espacio de búsqueda original (fuerza bruta). Sin embargo, consideramos que la solución propuesta representa un buen compromiso entre reducir la complejidad del problema y el desempeño obtenido. Finalmente, resulta hasta cierto punto razonable primero separar con la mayor distancia posible AP en el mismo canal (después de ejecutar el algoritmo de selección de canal) previo a la utilización del segundo algoritmo que busca optimizar la potencia de transmisión y umbral de sensibilidad de AP en el mismo canal. Por otro lado, como se puede observar en la Tabla 3.3, el hecho que los algoritmos propuestos sólo consideren a los dos vecinos más cercanos entre si reduce de manera dramática el número de combinaciones posibles que los algoritmos propuestos deben explorar. De manera general, cada que la terminal móvil encuentra en su camino una pareja de AP que sean vecinos más cercanos entre sí, sólo debe considerar 9 combinaciones posibles para el algoritmo de selección de canal y 16 combinaciones posibles para el algoritmo de selección de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad.

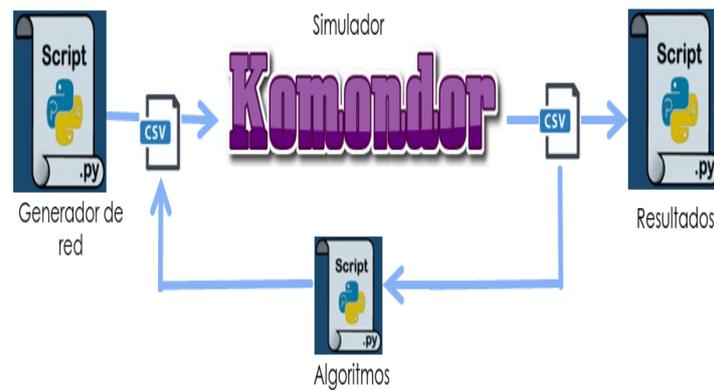


Figura 3.2: Diagrama de flujo de simulaciones

Para poder realizar un experimento primeramente se genera el escenario de simulación mediante un *script* escrito en el lenguaje de programación *Python*, el cual consiste en una plataforma de simulación que genera el escenario de la red así como el recorrido de la terminal móvil, generando un archivo csv con la configuración inicial de cada AP mismo que es simulado con *Komondor* devolviendo a su vez otro archivo csv con los resultados obtenidos del *throughput* de cada AP.

Una vez generado el recorrido de la terminal móvil puede comenzar propiamente el experimento. Durante su recorrido, en el momento que la terminal móvil detecta dos o más AP que, por su posición, se encuentren generando interferencia entre ellos (se encuentren dentro de su rango de sensibilidad), ejecuta sólo uno de los algoritmos propuestos (en caso de que se quiera estudiar el impacto individual de alguno de los dos algoritmos) o ejecuta los dos algoritmos (para estudiar su impacto de manera simultánea). Posteriormente, la terminal móvil, envía, de ser el caso, las recomendaciones de cambios de configuración a los AP detectados. Los algoritmos propuestos también se han implementado mediante un *script* en el lenguaje de *Python*. En caso de que los AP acepten el cambio de configuración sugerido por la terminal móvil se genera un nuevo archivo csv que contiene los cambios de configuración realizados respecto a la configuración inicial. Estos

cambios son simulados en *Komondor* quien sobrescribe los resultados en un archivo csv. De esta manera cada que al menos uno de los AP cambie su configuración se detiene el tiempo, se corre la simulación de la red en *Komondor* para obtener el nuevo *throughput* de cada AP en ese instante, y posteriormente se reactiva el transcurrir del tiempo hasta que cambie la configuración de otro AP repitiendo este procedimiento hasta el final de la simulación.

Una vez terminado el recorrido de la terminal móvil y simulados todos los cambios generados en la configuración de los AP en la red de estudio se analizan los resultados del *throughput* generado por cada cambio de configuración mediante otro *script* en *Python* el cual se encarga de obtener el *throughput* promedio de la red y presentarlo de manera gráfica.

3.8. Plataforma de simulación

Para poder llevar a cabo este proyecto se han generado diferentes escenarios de simulación, en los cuales se colocaron de manera aleatoria en la red de estudio varios AP con una configuración inicial correspondiente al número 1 de las 4 posibles que se han planteado (Potencia de 20 dBm y umbral de sensibilidad de -90 dBm). A esta configuración 1 en lo sucesivo se le llamará la configuración *default*, debido a que en muchos casos es la configuración con la que los AP son instalados en casa y oficinas. Además, cada AP cuenta con un único cliente y el envío de datos es en modo *downlink* únicamente. Las posiciones de cada cliente se establecen de manera aleatoria dentro del rango de cobertura de su respectivo AP. La Figura 3.3 muestra la plataforma que fue programada para poder observar gráficamente los escenarios de estudio. Los puntos rojos representan los AP, la circunferencia roja corresponde su rango de cobertura, mientras que los puntos amarillos son los clientes (estos cuentan con una letra minúscula correspondiente al ID del AP al que pertenecen).

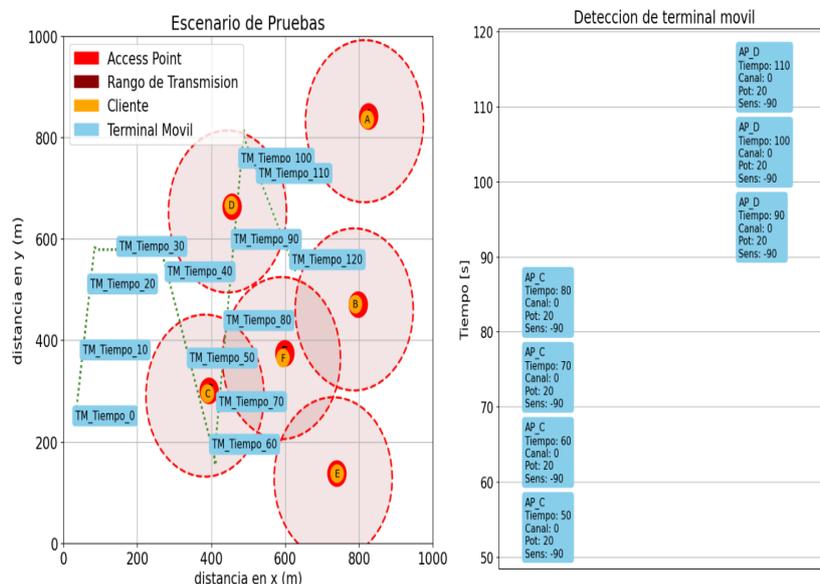


Figura 3.3: Plataforma de simulación

Además de AP y clientes, se ha establecido la presencia de una terminal móvil, la cual posee un modelo de movilidad del tipo *random waypoint*. Mientras la terminal móvil recorre el área de estudio, cada 10 segundos se detiene el tiempo, se grafica su posición mientras la terminal móvil sensa su entorno, es decir se revisa si se encuentra dentro del rango de cobertura de algún AP. En caso de ser así la terminal móvil guarda la información con la que opera dicho AP y posteriormente la utiliza como dato de entrada para alguno de los dos algoritmos propuestos. En la figura 3.3 se grafica el recorrido de la terminal móvil con una línea punteada, cada 10 segundos se grafica la

posición en la que se encuentra.

Tiempo de detección [s]	AP	Canal de operación	Potencia de transmisión [dBm]	Umbral de sensibilidad [dBm]	Coordenadas del AP [m]	Coordenadas del cliente [m]
50	D	0	20	-90	(45,20)	(52,18)
50	F	0	20	-68	(50,17)	(58,32)
90	A	1	5	-68	(205,48)	(220,60)
130	B	0	5	-90	(420,351)	(425,370)
130	G	1	20	-90	(402,339)	(412,342)
200	A	1	5	-68	(205,48)	(220,60)
200	D	2	20	-90	(195,40)	(200,46)
200	J	1	20	-90	(210,52)	(218,62)

Cuadro 3.4: Parámetros recopilados por la terminal móvil durante su recorrido.

El recuadro derecho presentado en la Figura 3.3 corresponde a una línea temporal que muestra los AP detectados por la terminal móvil durante su recorrido, es decir, cada que entra en el rango de cobertura de algún nodo se grafica la información de operación que posee el AP detectado, así como el tiempo en el que se detecta. Además, la terminal móvil guarda en su memoria que ese AP ha sido detectado y con que configuración. Hay que mencionar que una vez que la terminal detecta al mismo tiempo dos o más AP generando interferencia entre sí, ejecuta alguno de los dos algoritmos propuestos. Dependiendo de ciertas condiciones que serán explicadas en el siguiente capítulo.

La Tabla 3.4 presenta un ejemplo de los parámetros que recopila la terminal móvil durante su recorrido. Una vez que la terminal móvil detecta a un AP guarda el tiempo de detección (esta acción se realiza cada diez segundos). Respecto al AP se guarda su ID una vez que la terminal móvil entró a su rango de transmisión. Posteriormente, al recibir información del AP es posible obtener sus parámetros de operación (canal de operación, potencia de transmisión y umbral de sensibilidad), las coordenadas en metros de los AP y de su cliente respectivo. En este trabajo dicha información es obtenida mediante los mensajes que los AP envían de manera periódica. Como parte de nuestro trabajo se ha considerado que tanto AP como clientes son elementos estáticos, por lo que las coordenadas no varían durante la simulación. En cambio el canal, potencia y umbral son elementos que cambian debido a la ejecución de nuestros algoritmos.

Capítulo 4

Algoritmo de selección de canal

El algoritmo presentado a continuación tiene como objetivo disminuir la interferencia generada entre AP vecinos que se encuentran operando con el mismo canal de transmisión asignándoles canales diferentes y reduciendo la interferencia generada entre ellos, mejorando el desempeño de la red.

El funcionamiento del algoritmo trabaja con la información recabada por la terminal móvil durante su recorrido. Como se comentó en el capítulo anterior, cada diez segundos la terminal móvil recaba información del entorno, identificando AP o clientes cercanos.

La terminal móvil tiene una memoria de los AP ya detectados anteriormente, así como los AP que está sensando en ese momento, es decir, aquellos AP que se ubican a menos de 140 m de la terminal móvil (distancia máxima de cobertura del AP con una potencia alta y el modelo de propagación utilizado).

El algoritmo de selección de canal requiere como entrada la información que ha recabado la terminal móvil en el pasado y en el tiempo presente. Esto incluye las coordenadas de los AP y los canales en los cuales están operando y que han sido registrados anteriormente, así como el número, posición y configuración de los AP que se están detectando en el tiempo presente y que se interfieren mutuamente. Posteriormente, el algoritmo calcula la distancia euclidiana entre los AP sensados, estableciendo a los vecinos más cercanos entre ellos. Con esta información se generan los casos que se explican a continuación.

4.1. Caso 1. La terminal móvil detecta sólo 1 AP y la memoria de encuentros previos está vacía.

Este evento no es un caso como tal, ya que el algoritmo de selección de canal no ejecuta acción alguna. Básicamente se trata de la acción que ejecuta la terminal móvil al iniciar su recorrido y detectar su primer AP debido a que su memoria no tiene registrada ninguna entrada de información previa, Al detectar un AP únicamente guarda sus parámetros de operación y continúa su recorrido, para posteriormente ejecutar alguno de los otros casos que se presentan a continuación.

La Figura 4.1 presenta un ejemplo de este caso. La terminal móvil recién comienza su recorrido a través de la red y en T_4 detecta a AP_A siendo el primer encuentro con algún AP. La terminal móvil registra las coordenadas de AP_A y Cl_A así como sus parámetros de operación. Al no tener un registro previo de otro AP con el cual interfiera AP_A en el tiempo actual la terminal móvil no ejecuta el algoritmo de selección de canal y simplemente continúa con su recorrido.

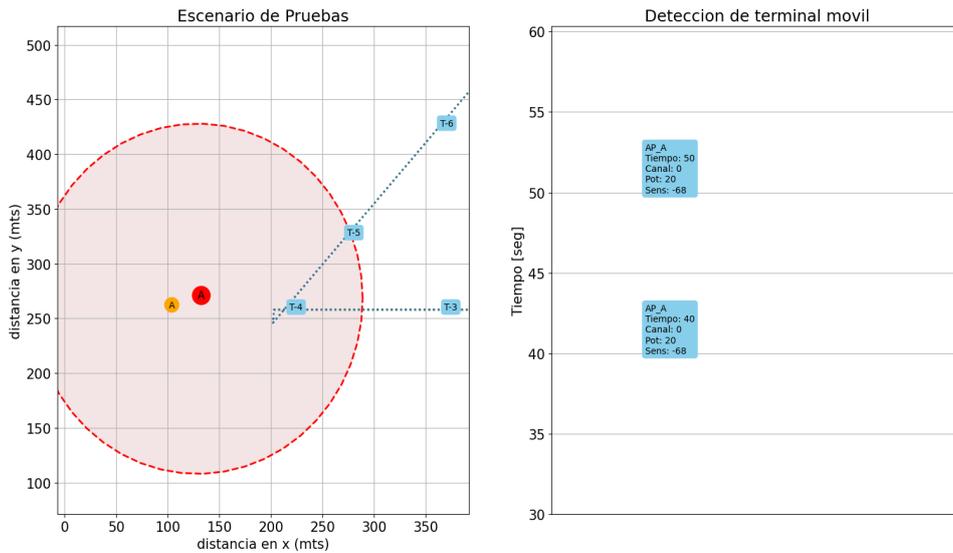


Figura 4.1: Ejemplo del caso 1 del algoritmo de selección de canal

4.2. Caso 2. La terminal móvil sólo detecta 1 AP con un registro de otro AP que interfiere con el AP detectado

En este caso la terminal móvil sólo detecta a 1 AP (AP_A) durante el tiempo presente, pero tiene un registro previo de otro AP (AP_B) que interfiere con AP_A (ambos AP operan en el mismo canal). La terminal móvil ejecuta el algoritmo de selección de canal que considera como entradas el canal de operación actual de AP_A y AP_B . El algoritmo deja a AP_B en su mismo canal, quita dicho canal de la lista de canales disponibles (ortogonales), y asigna un nuevo canal a AP_A (Ch_A) de manera aleatoria entre los canales disponibles en la lista de canales disponibles actual.

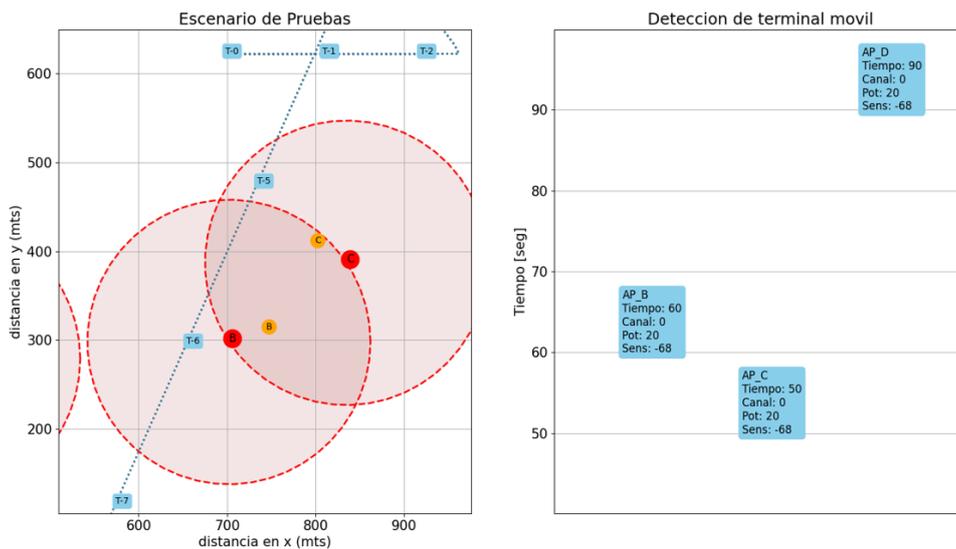


Figura 4.2: Ejemplo del caso 2 del algoritmo de selección de canal

En la figura 4.2 se ilustra el Caso 2. La terminal móvil detecta al AP_C en el tiempo T_5 y guarda su configuración de operación, mientras que en T_6 detecta al AP_B . Al conocer su información de operación, detecta que ambos AP operan en el mismo canal, activando el algoritmo de selección

de canal. Al ya no tener comunicación con AP_C la sugerencia de cambio de canal será sólo para AP_B con el que todavía se tiene comunicación en T_6 , eligiendo para AP_B un canal de manera aleatoria entre los canales disponibles después de quitar el canal utiliza AP_C (canales 1 o 2 en este caso).

4.3. Caso 3. La terminal móvil detecta 2 AP al mismo tiempo

En este caso la terminal tiene comunicación con dos nodos (AP_A y AP_B) al mismo tiempo, que a su vez son respectivamente su vecino más cercano entre sí. El algoritmo escoge a AP_A por poseer el menor ID, se toma Ch_A y se elimina de los canales disponibles. De los canales restantes se escoge de manera aleatoria Ch_B .

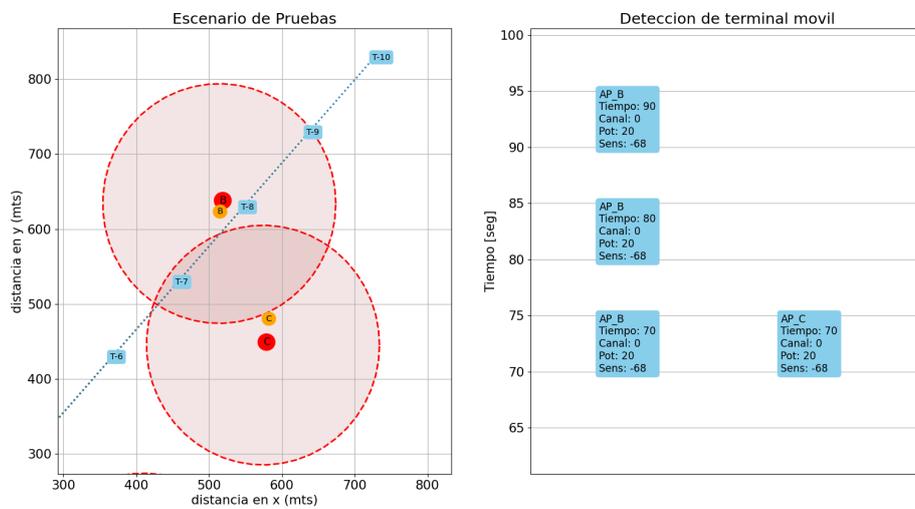


Figura 4.3: Ejemplo del caso 3 del algoritmo de selección de canal

En la figura 4.3 se muestra un ejemplo de este caso, donde en T_7 la terminal móvil detecta de manera simultánea AP_B y AP_C , que en este ejemplo operan en el mismo canal. La terminal móvil ejecuta el algoritmo de asignación de canal dando prioridad al AP_B por tener el menor ID. Por tanto, el algoritmo elige aleatoriamente uno de los dos canales disponibles (1 o 2) para que opere AP_C .

4.4. Caso 4. La terminal móvil detecta 3 AP al mismo tiempo

En este caso la terminal móvil detecta tres AP (AP_A y AP_B y AP_C) al mismo tiempo, y que corresponden a los dos vecinos más cercanos al nodo con menor ID (AP_A). De manera similar al caso 2, se elimina Ch_A de los canales disponibles, Ch_B es escogido de manera aleatoria y se elimina de los canales disponibles lo que deja un único canal disponible que es asignado para Ch_C .

Como ejemplo de este caso tenemos la Figura 4.4 donde en T_3 la terminal móvil detecta AP_H , AP_I y AP_J de manera simultánea y operando en el mismo canal. Al ejecutar el algoritmo se le da prioridad al AP_H por tener el menor ID, posteriormente se elige aleatoriamente un canal disponible (1 o 2) para AP_I que tiene el menor ID después de AP_H , finalmente, el canal para AP_J será el último disponible ((1 o 2) - CH_{AP_I}).

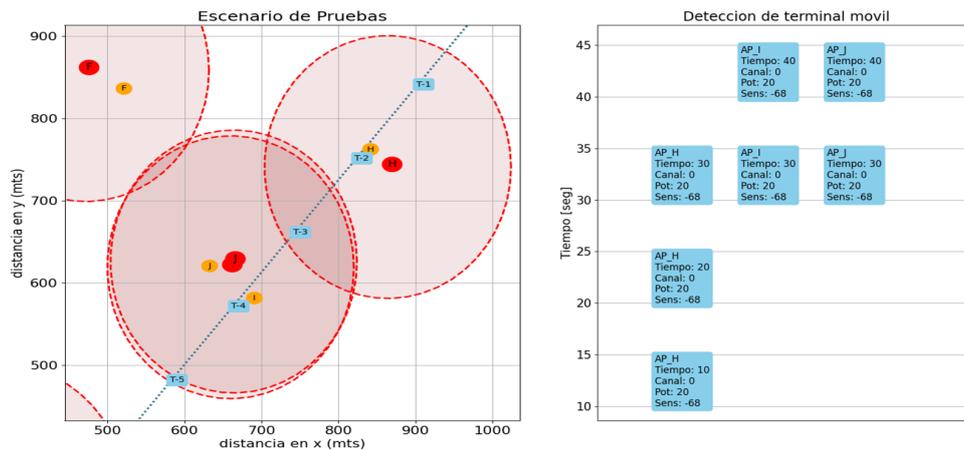


Figura 4.4: Ejemplo del caso 4 del algoritmo de selección de canal

4.5. Caso 5. La terminal móvil detecta 3 o más AP al mismo tiempo

Si se llega a presentar la detección de más de 3 AP al mismo tiempo que operen con el mismo canal, la terminal móvil crea una terna con los vecinos más cercanos del AP con el menor ID para correr el algoritmo de selección de canal como si se tratara del Caso 4. Posteriormente el algoritmo considera el resto de los AP detectados que no se incluyeron en la terna considerada inicialmente, en caso de que sea más de un AP se ejecuta el algoritmo nuevamente con el Caso 2 o Caso 3, dependiendo de los AP que no se involucraron en la iteración anterior. Este proceso se repite hasta que ya no sea posible generar más ternas o duplas de AP para asignarles un nuevo canal de operación.

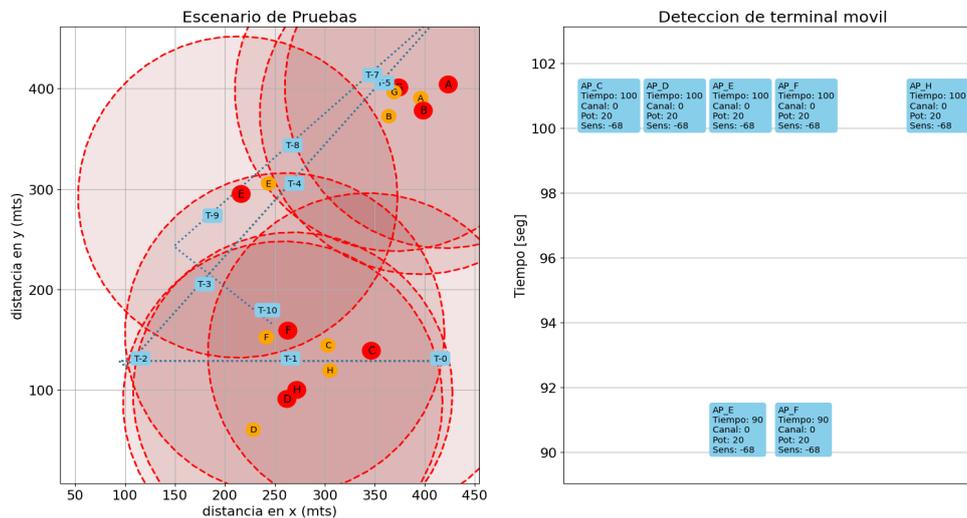


Figura 4.5: Ejemplo del caso 5 del algoritmo de selección de canal

La Figura 4.5 presenta un ejemplo de este caso en el cual la terminal móvil detecta en T_{10} a 5 AP de manera simultánea (AP_C , AP_D , AP_E , AP_F y AP_H). El AP con menor ID es AP_C , por lo que se le da preferencia durante esta ronda y se busca a sus dos vecinos más cercanos detectados en este momento, (AP_F y AP_H). Con esta terna se corre el algoritmo de selección de canal como en el Caso 4 para asignarles su respectivo canal de operación. Ahora quedan AP_D y AP_E que no fueron involucrados en la iteración anterior, al tratarse de una pareja se ejecuta el algoritmo de

selección de canal de operación como en el Caso 3, asignando su respectivo canal de operación para cada AP. Debido a que ya no hay más AP sobrantes la terminal continúa su recorrido por la red.

Para finalizar la ejecución del algoritmo de selección de canal, la terminal móvil transmite las recomendaciones de cambio de canal generadas para cada uno de los AP involucrados en cualquiera de los casos presentados anteriormente. La ventaja que presenta el uso de una terminal móvil es que permite realizar un análisis de la operación de los AP desde diferentes trayectorias, pudiendo agrupar AP en subredes de pocos elementos y sugerir canales de operación a los AP que se encuentren en su camino mientras atraviesa la red.

4.6. Pseudocódigo. Algoritmo de selección de canal

A continuación, se presenta el pseudocódigo correspondiente al algoritmo de asignación de canal para n canales. La Tabla 4.1 define la nomenclatura utilizada para el pseudocódigo 3.

Nomenclatura	Parámetro que representa
AP_{det}	AP detectados en el tiempo actual
Num_{AP}	Número de AP detectados en el tiempo actual
$chans$	Número de canales disponibles n
$chan_{act}$	Canales activos de los AP detectados
$chan_{disp}$	Canales disponibles para utilizar
$chan_{rec}$	Canales recomendados por el algoritmo
m	Número de grupos conformados

Cuadro 4.1: Nomenclatura utilizada pseudocódigo algoritmo de asignación de canales.

Algorithm 3 Asignación de Canal

Input: $Num_{AP} \in \mathbb{N}$, $AP_{det} = \{AP_i, AP_j, \dots, AP_n\}$, $chans \in \mathbb{N}$, $chan_{disp} = \{1, 2, \dots, chans\}$,
 $chan_{act} = \{chan_{AP_i}, chan_{AP_j}, \dots, chan_{AP_n}\}$

Output: $chan_{rec} = \{chan_{rec_{AP_i}}, chan_{rec_{AP_j}}, \dots, chan_{rec_{AP_n}}\}$

$m = 0$

while $Num_{AP} > 1$ **do**

for $i \leftarrow 1$ **to** $chans$ **do**

$Grupo_m \leftarrow chan_{AP_i}$

$AP_{det} = AP_{det} - AP_{det_i}$

end for

$Num_{AP} = Num_{AP} - chans$

$m = m + 1$

end while

for $i \leftarrow 0$ **to** m **do**

for $j \leftarrow AP$ **in** $Grupo_i$ **do**

$chan_{disp} = chan_{disp} - chan_{AP_j}$

if $chan_{disp} = null$ **then**

break

else

$chan_{AP_{j+1}} \leftarrow \text{random choice } \{chan_{disp}\}$

$chan_{rec} \leftarrow chan_{AP_{j+1}}$

end if

end for

end for

send $\{chan_{rec}\}$

Capítulo 5

Algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad

El segundo algoritmo implementado en la terminal móvil tiene como objetivo enviar recomendaciones tanto de potencia de transmisión como de umbral de sensibilidad a los AP que la terminal móvil descubre durante su recorrido dentro de la red. Con este algoritmo es posible encontrar la mejor configuración de potencia y umbral para AP cercanos que operan en el mismo canal de tal forma que mejoren su tasa de transmisión (*throughput*).

De manera general, el algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad funciona de la siguiente forma. Cuando la terminal móvil encuentra a dos AP cercanos, consulta una base de datos pregrabada donde ingresa la posición de los dos AP y sus respectivos clientes, y como salida la base de datos arroja la mejor configuración de cada AP. Acto seguido la terminal móvil sugiere dichas configuraciones a los AP y continúa su recorrido.

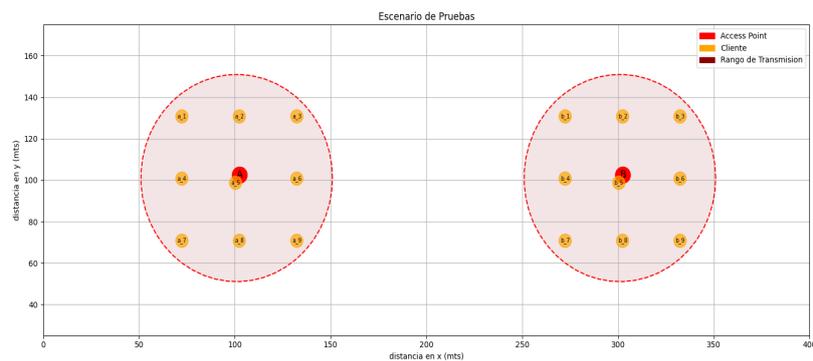


Figura 5.1: Topología utilizada para la base de datos

5.1. Base de datos

La base de datos en cuestión se encuentra precargada dentro de la memoria de la terminal móvil. La base de datos fue obtenida mediante la simulación de cientos de escenarios que involucran a dos nodos (AP_A y AP_B) como se muestra en la Figura 5.1, en donde se encuentran dos (AP_A y AP_B) separados por una distancia x que va aumentando 50 metros por cada escenario. Para posicionar la ubicación del cliente de cada AP en el experimento, se propusieron 9 posibles posiciones ubicadas en una retícula dentro del rango de cobertura del AP como se muestra en la Figura 5.1.

De esta manera, para cada distancia dada entre los dos AP, se presentan un total de 81 combinaciones posibles dada la posición de ambos clientes ($9_{Posiciones_{Cl_A}} * 9_{Posiciones_{Cl_B}} = 81_{Escenarios}$). Posteriormente cada uno de estos 81 escenarios fue simulado con las 4 configuraciones disponibles para cada AP, resultando en $81_{Escenarios} * 4_{conf_{AP_A}} * 4_{conf_{AP_B}} = 1296_{Simulaciones}$ para generar un total de 1296 archivos que serían simulados para una distancia de separación fija entre los dos AP. Este procedimiento se repitió para varias distancias posibles entre los dos AP.

Una vez simulados todos los posibles escenarios, estos fueron procesados para encontrar la mejor configuración de potencia y umbral para cada AP en cada uno de ellos. Estos resultados se pregrabaron dentro de una base de datos en la terminal móvil, la cual se consulta cada vez que esta se encuentra en presencia de dos AP en el mismo canal durante su recorrido.

De manera similar al algoritmo de asignación de canal, la terminal móvil guarda la información de los AP que va detectando a lo largo de su recorrido, registrando el tiempo, la configuración actual y las coordenadas de cada AP y de su respectivo cliente.

Cuando la terminal móvil detecta un nuevo AP revisa en sus registros si dicho AP tiene vecinos cercanos operando en el mismo canal y determina, de entre ellos, la distancia existente entre el nodo recién detectado y su vecino más cercano D_{vec} . Posteriormente, se busca encontrar un escenario de simulación similar en la base de datos donde la distancia entre los AP y la posición de sus clientes sea lo más cercana a la posición real de los AP y sus clientes (Cl_A y Cl_B). De dicho escenario de simulación se consulta cual es la configuración de cada AP que maximice la tasa de transmisión para cada uno de los dos AP. Con esta información se presenta alguno de los siguientes casos, dependiendo del número y posición de los AP con los que la terminal móvil tenga contacto de un determinado tiempo.

5.2. Caso 1. La terminal móvil detecta un AP por primera vez y no hay registros de otros AP en la memoria.

De manera similar al algoritmo de selección de canal, el Caso 1 corresponde cuando la terminal móvil recién comienza su recorrido y la detección del primer AP que conforma la red. Al no tener información previa de algún otro AP no es posible establecer vecindades y por ende ejecutar el algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad. La única acción que puede realizar la terminal móvil en el Caso 1 es registrar la información de operación y coordenadas del AP y de su cliente para después continuar con su recorrido.

La Figura 5.2 presenta un escenario donde se ejemplifica el Caso 1. La terminal móvil recién inicia su recorrido y en T_1 detecta a AP_C . Como no hay ningún registro previo la terminal móvil sólo registra su información de operación y coordenadas de AP_C y Cl_C para continuar con su recorrido. Posteriormente, en T_3 , la terminal móvil detecta a AP_D . Al tener información de un vecino previo (en el mismo canal) ya es posible ejecutar el Caso 2 del algoritmo propuesto, este caso se explica a continuación.

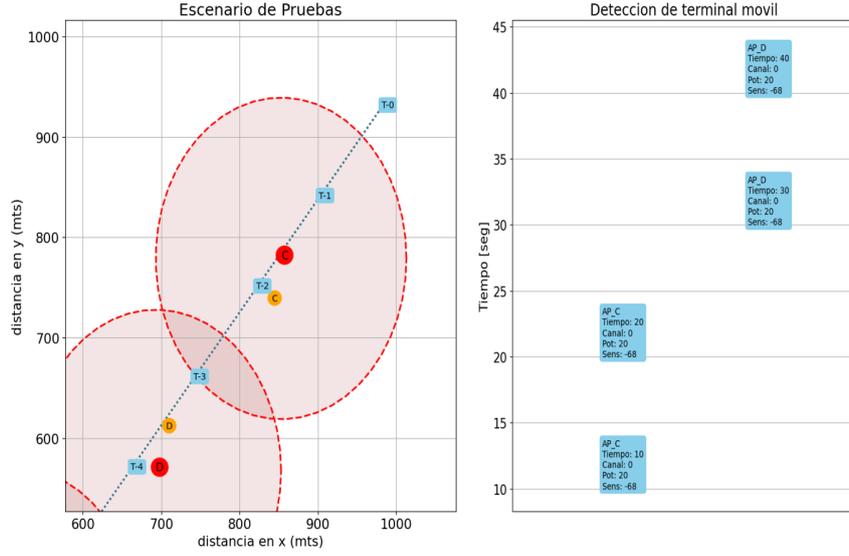


Figura 5.2: Ejemplo del caso 1 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad

5.3. Caso 2. La terminal móvil detecta un AP pero tiene un registro de otro AP que interfiere con el AP detectado.

Este caso define un evento en el cual la terminal móvil tiene contacto con AP_A , el cual se encuentra interfiriendo con AP_B con quien ya no se tiene conexión, pero se detectó en con anterioridad y se tiene registrada su información. Se determina la distancia de separación entre estos dos AP y se confirma que son los vecinos más cercanos entre ellos en la red y generan interferencia. La terminal móvil consulta su base de datos con la separación de los dos AP, sus configuraciones actuales $Conf_{AP_A}$ y $Conf_{AP_B}$, y la posición de sus respectivos clientes para obtener cual es la mejor configuración para cada AP, $Conf_{BD_A}$ y $Conf_{BD_B}$. La terminal móvil envía recomendaciones de configuración al AP con el que tiene contacto (AP_A), y guarda la configuración de AP_B hasta que se restablezca la comunicación con dicho AP en un tiempo posterior. Al tener comunicación con AP_A se le envía la recomendación sólo en caso de ser diferente a $Conf_{BD_A}$, mientras que en el caso de AP_B también se compara con la configuración $Conf_{BD_B}$ y, en caso de ser diferente, esta configuración se guarda en la memoria de la terminal móvil hasta que esta vuelva a tener conexión con AP_B y le pueda enviar la recomendación.

En la Figura 5.3 se presenta un ejemplo de la operación del algoritmo, donde en T_0 y T_1 la terminal móvil detecta al nodo AP_C (registrando su configuración de operación $Conf_{act_C}$) y en T_2 detecta al nodo AP_A . Ambos AP son su vecino más cercano, respectivamente, y generan interferencia mutua por lo cual se ejecuta el algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad. El algoritmo estima la distancia de separación entre los AP y también la posición de sus clientes. Con estos parámetros se consulta la base de datos y se obtienen las configuraciones más favorables para cada AP ($Conf_{BD_A}$ y $Conf_{BD_C}$), y se comparan con sus configuraciones actuales. Suponiendo que las configuraciones que propone el algoritmo son diferentes, se le envía la recomendación a AP_A ($Conf_{act_A} = Conf_{BD_A}$) dado que se tiene comunicación con AP_A en T_2 . Para AP_C la recomendación es que $Conf_{act_C} = Conf_{BD_C}$; sin embargo, al no existir comunicación con dicho AP la recomendación es guardada en la memoria de la terminal móvil. En T_{18} la terminal móvil vuelve a establecer conexión con AP_C , por ende la recomendación es enviada en dicho momento.

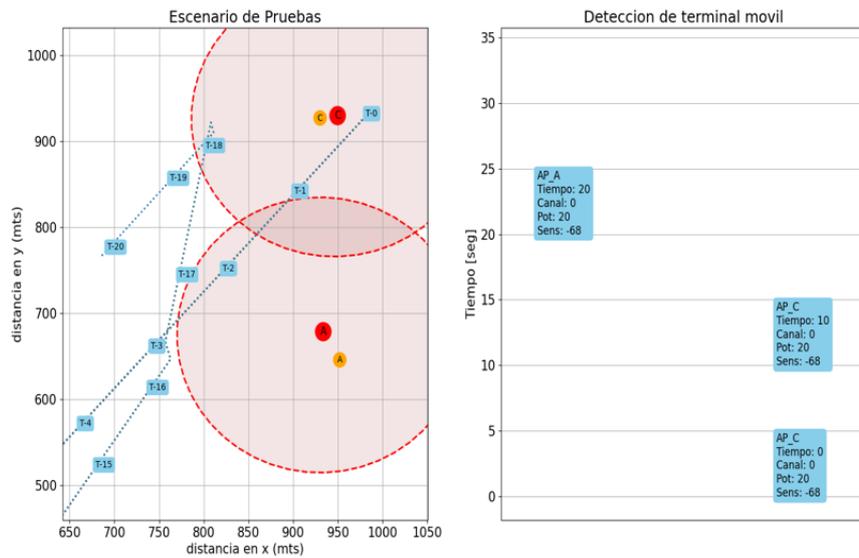


Figura 5.3: Ejemplo del caso 2 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad

5.4. Caso 3. La terminal móvil detecta 2 AP al mismo tiempo.

En este caso la terminal móvil tiene conexión con 2 AP al mismo tiempo, AP_A y AP_B . Estos AP corresponden al vecino más cercano de cada nodo, respectivamente y se conocen las configuraciones actuales con las que opera cada uno ($Conf_{act_A}$, $Conf_{act_B}$). Ambas configuraciones se comparan con las configuraciones que arroja la base de datos ($Conf_{BD_A}$ y $Conf_{BD_B}$) en caso de ser diferentes se le sugiere a los dos AP que cambien sus configuraciones actuales por las recomendadas ($Conf_{act_A} = Conf_{BD_A}$ y $Conf_{act_B} = Conf_{BD_B}$).

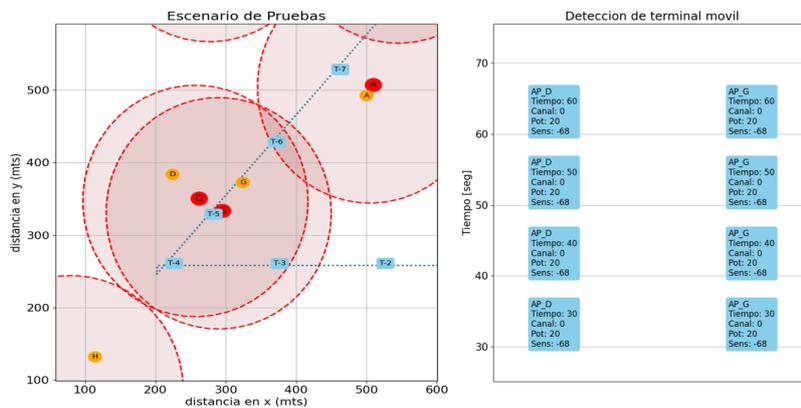


Figura 5.4: Ejemplo del caso 3 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad

Se presenta un ejemplo de este caso en la Figura 5.4 donde a partir de T_3 la terminal móvil detecta a AP_D y al AP_G , y obtiene sus configuraciones de operación ($Conf_{act_D}$ y $Conf_{act_G}$), siendo uno el vecino más cercano del otro, respectivamente. El algoritmo determina la distancia de separación entre los AP y junto con la posición de sus clientes selecciona un escenario aproximado en la base de datos obteniendo la mejor configuración para cada AP ($Conf_{BD_D}$ y $Conf_{BD_G}$). Posteriormente se comparan dichas configuraciones con las configuraciones actuales de cada AP, suponiendo que son diferentes se les envía la recomendación de cambiarlas ($Conf_{act_D} = Conf_{BD_D}$ y $Conf_{act_G} = Conf_{BD_G}$).

5.5. Caso 4. La terminal móvil detecta 3 o más AP al mismo tiempo.

En este caso la terminal móvil detecta 3 o más AP de manera simultánea, sin embargo, la operación del algoritmo propuesto se centra en trabajar con la pareja de vecinos más cercanos entre ellos. Por este motivo al existir más de dos AP es necesario estimar la distancia entre los AP detectados en el tiempo actual, para posteriormente seleccionar a los dos AP con las menores distancias entre ellos, ya que corresponden a las parejas más próximas. Después, con la distancia estimada, es posible ejecutar el Caso 2 del algoritmo para dichas parejas y enviar recomendaciones a varios AP de manera simultánea.

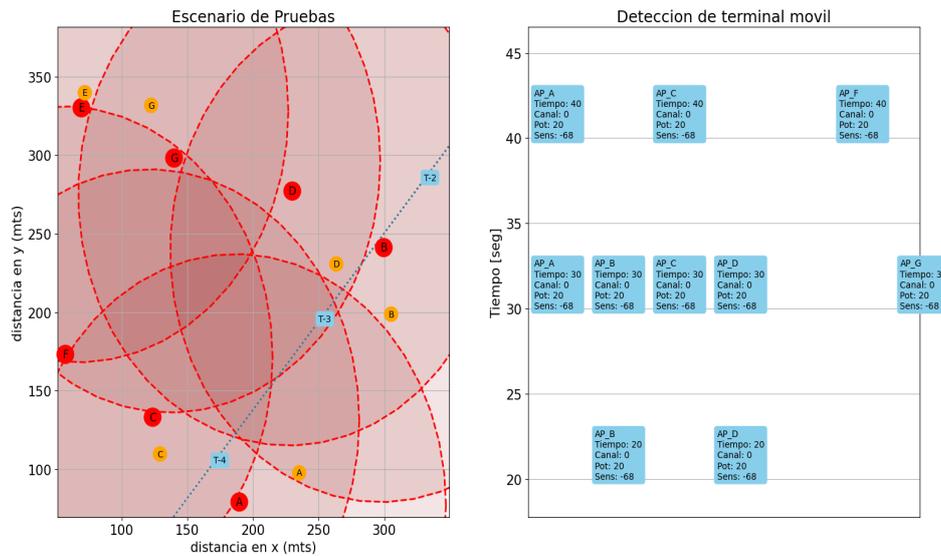


Figura 5.5: Ejemplo del caso 4 del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad

La Figura 5.5 presenta un ejemplo de una red saturada con muchos AP interfiriendo unos con otros. En este caso la terminal móvil detecta en T_3 a 5 AP (AP_A , AP_B , AP_C , AP_D y AP_G) de manera simultánea operando en el mismo canal. En este momento la terminal móvil tiene la información de la posición de cada AP y su configuración actual. Con esta información es posible estimar la distancia de cada AP con sus vecinos y saber cuál es el vecino más cercano de cada uno de ellos. En la Figura 5.5 se tienen dos parejas: la de AP_A con AP_C y la de AP_B con AP_D y, como ya se conoce la distancia relativa entre cada pareja es posible continuar con el Caso 2 del algoritmo propuesto. Una vez encontradas las mejores configuraciones en la base de datos ($Conf_{BD_A}$, $Conf_{BD_C}$, $Conf_{BD_B}$ Y $Conf_{BD_D}$), se comparan con las configuraciones actuales ($Conf_{act_A}$, $Conf_{act_C}$, $Conf_{act_B}$ Y $Conf_{act_D}$) y en caso de ser diferentes se envía la recomendación de cambio de configuración de operación.

5.6. Pseudocódigo. Algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad

Se presenta el pseudocódigo desarrollado para el algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad. El algoritmo requiere de la información de los AP detectados AP_{det} , la base de datos cargada previamente BD , así como las configuraciones actuales $Conf_{act_{AP}}$ que poseen los AP detectados y por último la posición estimada del cliente del AP Cl_{AP} .

Nomenclatura	Parámetro que representa
AP_{det}	AP detectados en el tiempo actual
Num_{AP}	Número de AP detectados en el tiempo actual
$Client_{POS}$	Posición de los clientes de cada AP detectado
$Conf_{act}$	Configuraciones de operación de los AP detectados
$Conf_{BD}_{AP_n}$	Configuraciones precargadas en la base de datos de la terminal
$Conf_{rec}$	Configuraciones recomendadas por el algoritmo
AP_A	AP en análisis
AP_B	AP más cercano para AP_A
Dis_n	Distancia entre el AP_A y sus vecinos
dis_{min}	Distancia mínima entre el AP_A y su vecino más cercano

Cuadro 5.1: Nomenclatura utilizada pseudocódigo algoritmo de potencia y umbral de sensibilidad.

Algorithm 4 Asignación de Potencia y Umbral de Sensibilidad

Input: $Num_{AP} \in \mathbb{N}$, $AP_{det} = \{AP_i, AP_j, \dots, AP_n\}$, $Client_{POS} = \{Cl_i, Cl_j, \dots, Cl_n\}$, $Conf_{act} = \{Conf_{act_{AP_i}}, Conf_{act_{AP_j}}, \dots, Conf_{act_{AP_n}}\}$, $Conf_{BD}$
Output: $Conf_{rec} = \{Conf_{rec_{AP_i}}, Conf_{rec_{AP_j}}, \dots, Conf_{rec_{AP_n}}\}$

```

for  $i \leftarrow 1$  to  $Num_{AP}$  do
   $AP_A \leftarrow AP_i$ ,  $Cl_A \leftarrow Cl_i$ 
  for  $j \leftarrow 1$  to  $Num_{AP}$  do
     $Dis_i = \{dist(AP_i, AP_j); i \neq j\}$ ;  $dist =$  Distancia euclidiana
  end for
   $dis_{min} = \{Dis_j < Dis_{j-1}, \dots < Dis_{j-n}\}$ 
   $AP_B \leftarrow AP_{dis_{min}}$ ,  $Cl_B \leftarrow Cl_{dis_{min}}$ 
   $(Conf_{BD}_{AP_A}, Conf_{BD}_{AP_B}) = BD(AP_A, AP_B, Cl_A, Cl_B, dis_{min})$ ;  $BD$  revisión de la Base
  de Datos
  if  $Conf_{act_{AP_A}} \neq Conf_{BD_{AP_A}}$  then
     $Conf_{act_{AP_A}} \leftarrow Conf_{BD_{AP_A}}$ 
     $Conf_{rec} \leftarrow Conf_{act_{AP_A}}$ 
  end if
end for
Send  $\{Conf_{rec}\}$ 

```

Capítulo 6

Experimentos

Para la realización de los experimentos se ocuparon distintos escenarios de un área de $A \times A$ m^2 en donde se distribuyen de manera aleatoria diez AP generando tráfico hacia sus respectivos clientes. Se consideró la distancia euclidiana media entre un AP y el resto de los AP en el área de estudio como medida de la densidad del escenario. La Figura 6.1 presenta la distancia media entre AP por cada escenario simulado, las distancias se agruparon en rangos de 10 metros. Observamos que para escenarios de (100x100 y 200x200 metros cuadrados) la separación media entre AP se agrupa en un rango pequeño. Conforme aumenta el tamaño del escenario, la distancia media aumenta su rango. Esto se puede observar en los escenarios de (500x500 y 1000x1000 metros) en donde la separación entre AP se incrementa de manera sustantiva.

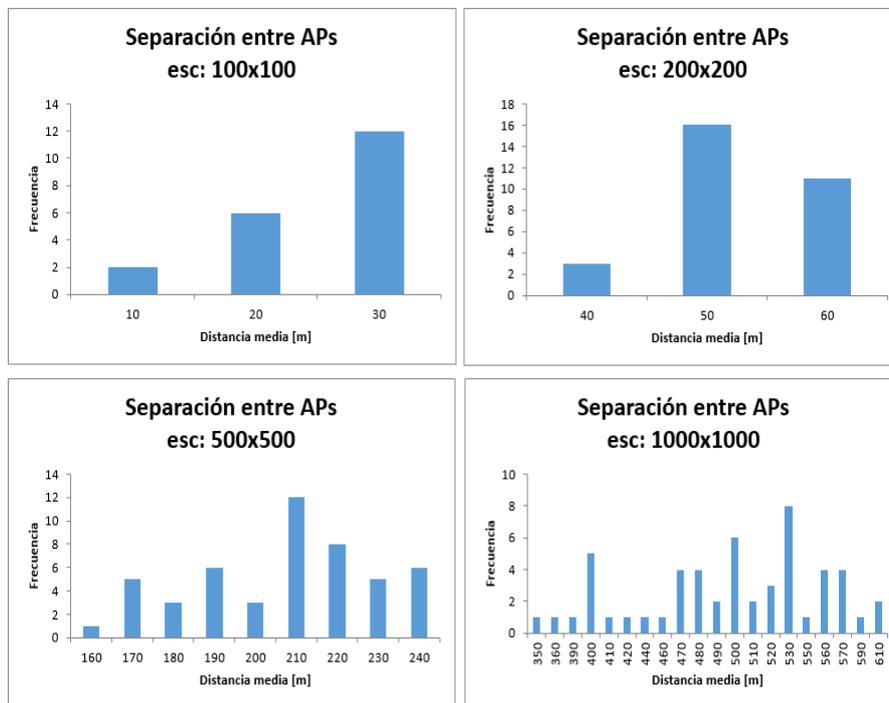


Figura 6.1: Separación promedio entre AP por cada escenario simulado

Los dos algoritmos propuestos se analizarán inicialmente de manera individual. Esto es, primero se ejecuta con el algoritmo de asignación de canales y, posteriormente, se ejecuta el algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad. En una primera instancia, una vez que la terminal móvil realiza su primer recorrido con el algoritmo de asignación de canal modificando los canales de los AP en su paso, se llega a un instante donde ya no se generan más

cambios de canal en el escenario de estudio. Es en este momento cuando se dice que el algoritmo de selección de canal converge y se toman los canales asignados a cada AP como punto de partida para la ejecución del algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad durante otro recorrido de la terminal móvil.

Posteriormente se analizará el desempeño de ambos algoritmos operando de manera simultánea durante el recorrido de la terminal móvil, para observar su comportamiento y la eficacia que presentan al trabajar de esta manera. Esto es, en un instante de tiempo se ejecuta el algoritmo de selección de canal e inmediatamente después el algoritmo de selección de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad.

6.1. Algoritmo de asignación de canal únicamente

A continuación, se presenta una descripción de los escenarios estudiados y los resultados de estos, únicamente con el algoritmo de selección de canal. Como parte de los experimentos se tomaron semillas aleatorias para generar escenarios con un total de 10 AP con posiciones aleatorias tanto de los AP como del cliente de cada AP. La posición de los clientes consiste en ubicaciones aleatorias ubicadas dentro del rango de cobertura del AP con una potencia baja de 5 dBm (de esta forma se garantiza que aun cuando un AP use potencia de transmisión baja pueda comunicarse con su cliente). La configuración de cada AP corresponde inicialmente a la configuración 1; es decir potencia de transmisión alta y umbral de sensibilidad bajo. Cada AP cuenta con un cliente único ubicado dentro de su rango de cobertura. La comunicación entre cada AP y su cliente es solo del tipo *downlink*. La terminal móvil establece su trayectoria de acuerdo con el modelo *random waypoint* durante aproximadamente 3 horas de recorrido hasta que el *throughput* promedio de la red tenga un comportamiento estable. Se realizaron experimentos de hasta diez horas de simulación observando que los cambios generados se envían dentro de las primeras 2 horas de los experimentos. En la Tabla 6.1 se presentan las características de los escenarios utilizados donde se consideraron tres densidades diferentes de AP para estudiar el funcionamiento del algoritmo de asignación de canal con densidades baja, media y alta de AP.

Experimento	Densidad alta	Densidad media	Densidad baja
Tiempo de Simulación	3 horas	3 horas	3 horas
Número de AP	10	10	10
Escenario m^2	200x200	500x500	1000x1000
Distancia media entre AP	50 m	203 m	460m
Distancia promedio al 1er Vecino más Cercano	17 m	78 m	175 m
Distancia promedio al 2o Vecino más Cercano	27 m	124 m	240 m
Distancia promedio al 3er Vecino más Cercano	35 m	152 m	303 m

Cuadro 6.1: Parámetros de experimentos con el algoritmo de asignación de canal

La configuración inicial para cada AP fue la C1 (*default*) transmitiendo en el mismo canal, el canal 0.

La Figura 6.2 muestra el desempeño obtenido con el algoritmo de asignación de canales para las tres densidades descritas anteriormente. La Figura 6.2 (izquierda) muestra tres ejemplos de las topologías utilizadas en los experimentos con la posición de los AP, sus clientes y los rangos de cobertura. La topología de la Figura 6.2 (a) corresponde a una red saturada ya que tanto los AP como los clientes se encuentran muy cercanos entre sí (densidad alta). La Figura 6.2(b) muestra un ejemplo de una red con saturación media mientras que la Figura 6.2(c) muestra una topología de una red poco saturada.

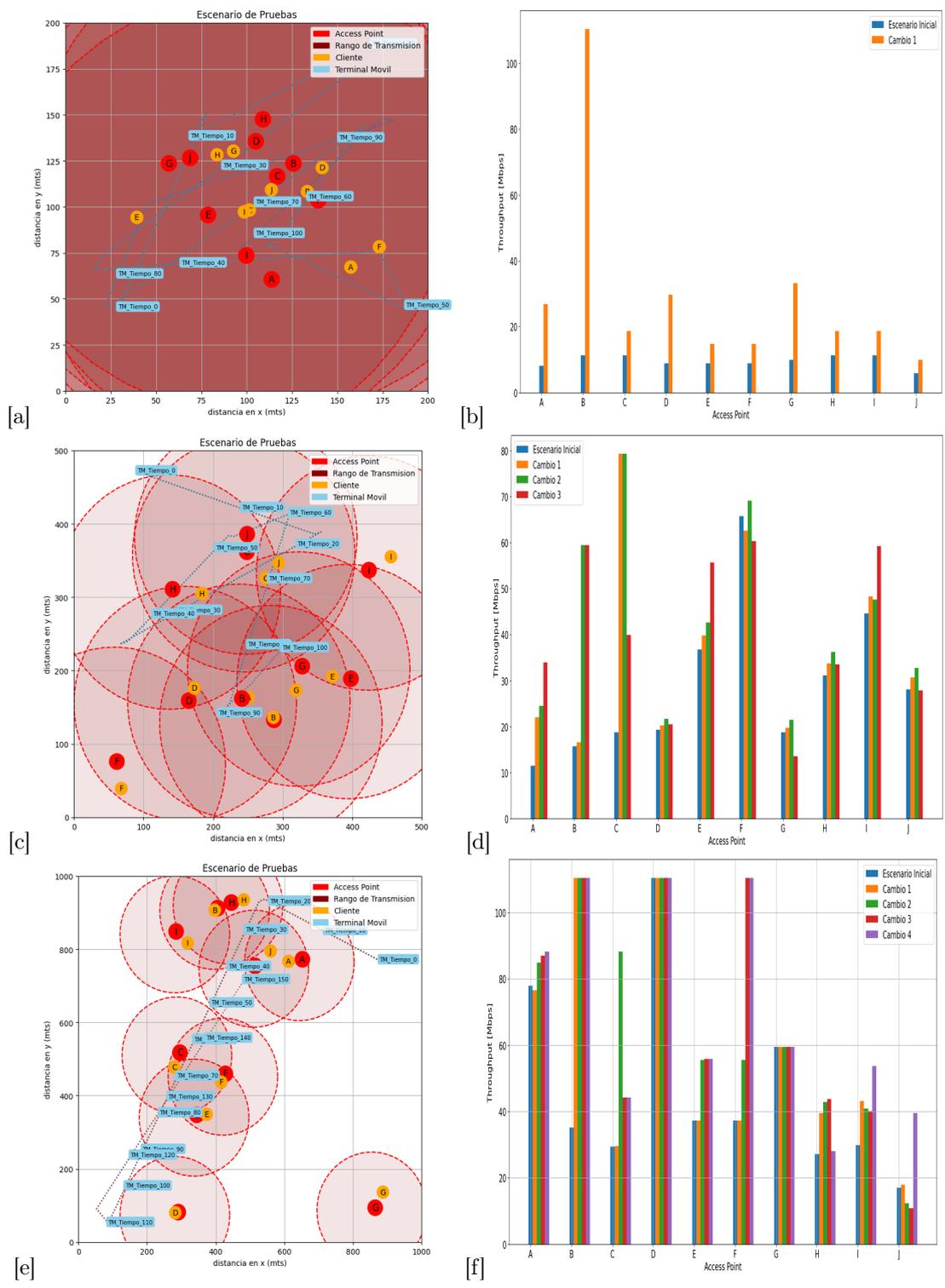


Figura 6.2: Topologías y experimentos específicos realizados con el algoritmo de asignación de canales para tres densidades.

La Figura 6.2 muestra el *throughput* obtenido por cada AP para la topología usada en ese experimento. La columna azul presenta el *throughput* generado con la configuración *default* de cada AP (potencia de 20 dBm y umbral de -90 dBm). Cuando la terminal móvil genera algún cambio de canal en cualquiera de los AP de la red se vuelve a obtener el *throughput* obtenido por todos los AP de la red en ese instante. Esta operación se repite tantos cambios de canal ocurran durante el tiempo de simulación

Se puede observar en la Figura 6.2b que en la red con saturación alta se genera un menor número de cambios de canal durante el recorrido de la terminal móvil comparado con otras densidades. Lo anterior se debe a que la terminal móvil se encuentra casi todo el tiempo dentro del rango de cobertura de la mayoría de los AP, por lo que dentro de los primeros segundos de simulación la terminal móvil puede conocer la ubicación de todos los AP y sus clientes, así como la configuración de canal. Dado que se conocen todas las características de la red la terminal móvil puede enviar las recomendaciones de configuración de manera casi simultánea a los AP vecinos más cercanos entre sí que se encuentren generando interferencia. Se observa que tras los cambios de canal generados el desempeño de cada AP mejora, pues resulta en un mayor *throughput* comparado con su configuración inicial *default*.

En el caso de la red con una saturación media el *throughput* con una configuración *default* es mayor al del escenario de alta densidad debido a que los AP se encuentran más separados unos de otros y no se interfieren tanto como en el caso con la saturación alta. Además, la menor densidad de AP permite que la terminal móvil genere más cambios en las configuraciones de los AP durante su recorrido en la red (no sólo al inicio de la simulación). Para esta densidad la terminal móvil tarda un mayor tiempo en conocer la topología y enviar las recomendaciones de cambio de canal a los AP durante su recorrido. En cuanto al desempeño de cada AP se observa que hay casos en los que el desempeño obtenido mejora tras cada cambio de canal, pero también hay cambios de canal que se traducen a una disminución del *throughput* para algunos AP. Esta situación ocurre pues al cambiar el canal de un AP puede cambiar de manera importante el *throughput* de otros AP que no cambiaron su canal en ese momento.

Por último, para una red poco saturada (Figura 6.2f) se observa que la mayoría de los AP tienen un mayor *throughput* cuando usan la configuración *default* debido a que existe una menor interferencia entre ellos. Con los cambios de canal generados por la terminal móvil durante su recorrido se observa que el desempeño de la mayoría de los AP aumenta en comparación con el desempeño obtenido con la configuración inicial. De manera similar al experimento con saturación media, existen un par de AP cuyo *throughput* final es inferior al *throughput* que obtuvieron en algún momento previo del experimento. Lo anterior nuevamente se debe a la dinámica propia del experimento donde el cambio inclusive de un solo canal en un AP puede afectar de manera importante el desempeño de todos los AP en ese momento.

En la Figura 6.3 se presentan los resultados del *throughput* obtenido por cada AP mientras transcurre el tiempo de simulación. La Figura 6.3a,c,e presenta el desempeño obtenido por cada AP de manera individual mientras que las Figuras de la parte derecha presenta el *throughput* promedio de todos los AP mientras transcurre el experimento.

En lo que respecta al *throughput* individual observamos que el desempeño obtenido por cada AP aumenta durante los primeros minutos de simulación. Para la red de alta saturación existen pocos cambios, y el tiempo para alcanzar el estado estable se alcanza prácticamente de manera inmediata debido a que la terminal móvil conoce la topología de la red, incluyendo la configuración inicial de cada AP, en poco tiempo. La red con saturación media genera más cambios de canal y el tiempo para alcanzar el estado estable aumenta un par de minutos. Por último, la red con poca saturación tarda más minutos para alcanzar el estado estable y que el *throughput* de cada AP se estabilice.

En cuanto a las gráficas de *throughput* promedio se observa que, en general, el *throughput* aumenta después de cada cambio. Destaca el experimento con una saturación media debido a que al final de la simulación no se logra el desempeño máximo observado en cambios anteriores. Donde se

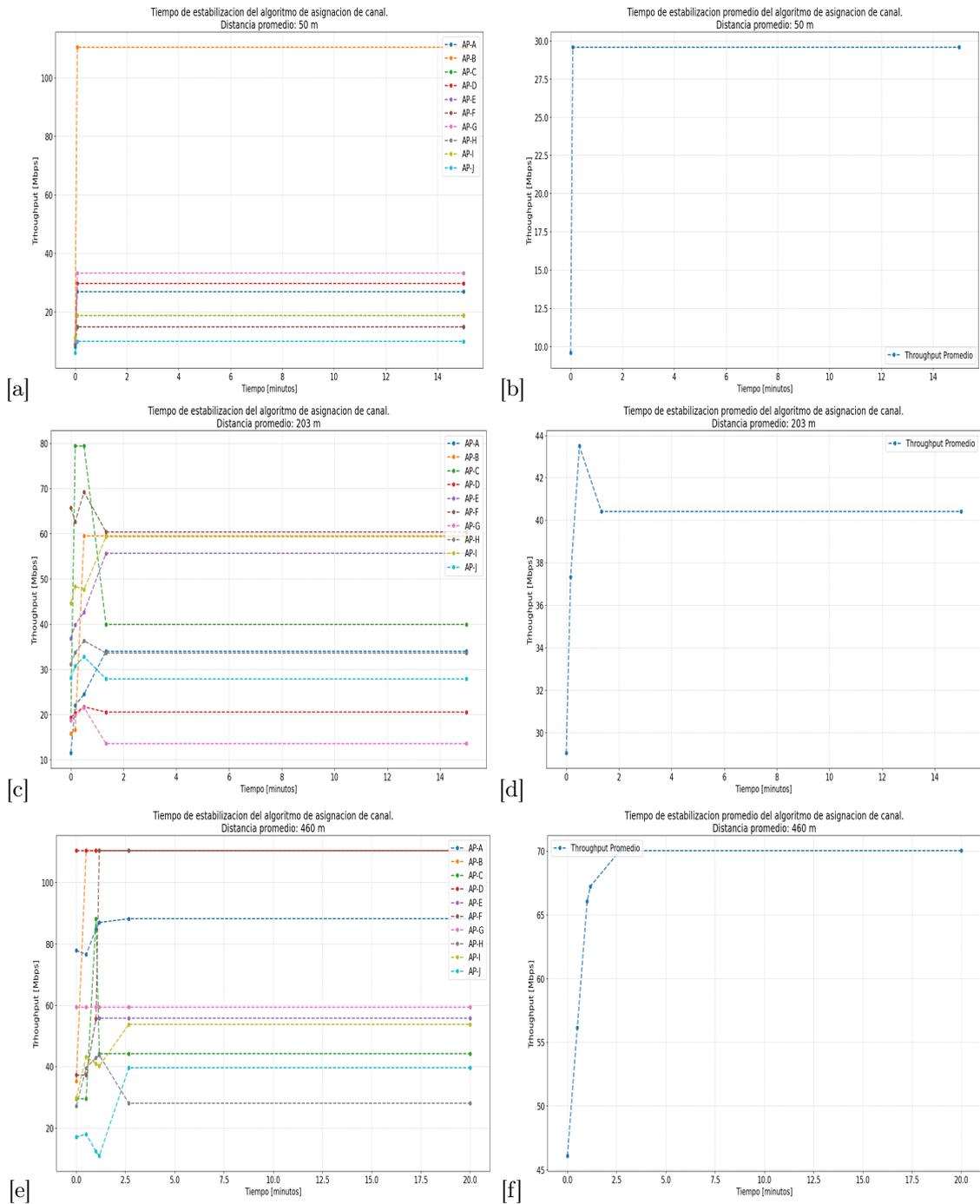


Figura 6.3: Comportamiento del *throughput* de forma individual y promedio para experimentos específicos realizados con el algoritmo de asignación de canales.

reduce el *throughput* final por 2 Mbps, aunque sigue siendo superior respecto al *throughput* inicial (*default*) de la red.

En la Figura 6.4 se presenta una comparación del desempeño del algoritmo de selección de canal con otros algoritmos similares encontrados en la literatura para las tres densidades de AP. Para este propósito se escogió al algoritmo de colores DSATUR [6], y al algoritmo de Parejas propuesto en [7].

Densidad de AP por unidad de área	Baja	Media	Alta
Tiempo de Simulación	3 horas	3 horas	3 horas
Número de AP	12	12	12
Escenario m^2	200x200	500x500	1000x1000
Distancia media entre AP	39 m	202 m	495 m
1er Vecino más Cercano	14 m	68 m	170 m
2o Vecino más Cercano	22 m	113 m	268 m
3er Vecino más Cercano	29 m	145 m	349 m

Cuadro 6.2: Datos para experimentos con el algoritmo de asignación de canal

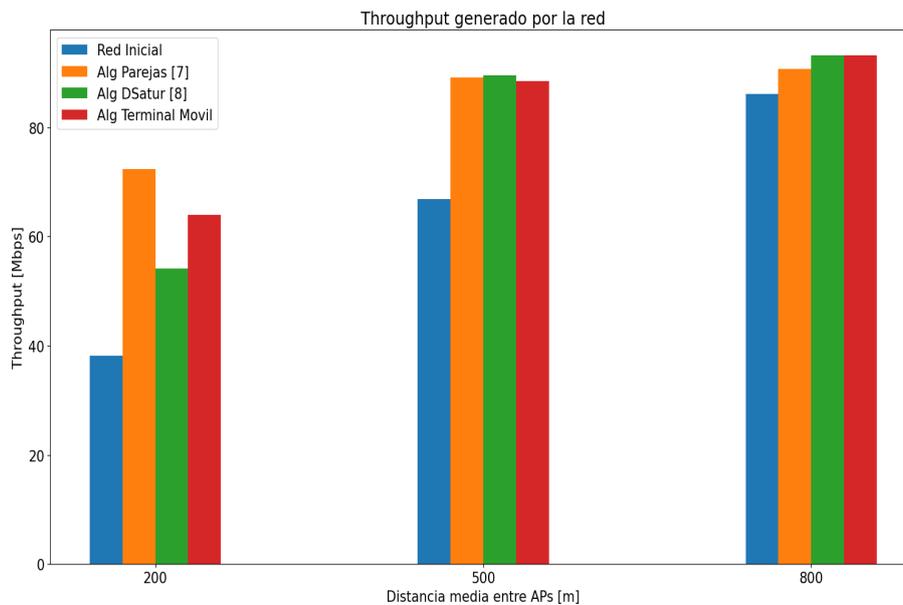


Figura 6.4: Comparativa de desempeño entre algoritmos de asignación de canal

En la Tabla 6.2 se presentan los valores utilizados en las simulaciones para densidades baja, media y alta. Para cada densidad se generaron varias topologías donde se varía de manera aleatoria la posición de los AP y sus clientes. Para cada experimento se utilizó la métrica de throughput promedio además de mostrar otros parámetros como la distancia promedio entre AP y la distancia promedio entre los vecinos más cercanos.

En el caso del algoritmo propuesto en este trabajo (color rojo), se muestra que obtiene resultados favorables ya que se aumenta el desempeño de la red comparado con la configuración inicial (*default*). El desempeño de nuestro algoritmo es similar al algoritmo de Parejas [7], aunque para distancias menores a 300 metros dicho algoritmo muestra ligeramente un mejor desempeño. El algoritmo de tercias es distribuido y opera de manera simultánea en cada AP. Por esta razón es capaz de asignar los canales que proporcionen el mayor *throughput* desde el inicio de la simulación. Esta es una ventaja con respecto a nuestro algoritmo, donde la terminal móvil debe primero recorrer la red para comenzar a enviar recomendaciones de cambios de canal los AP desde la perspectiva que

tiene de la topología en ese momento.

Por lo correspondiente al algoritmo DSATUR [6] se observa que nuestro algoritmo registra un mejor desempeño en redes saturadas con distancia media de separación. El algoritmo DSATUR [6] jerarquiza los AP conforme a la cantidad de vecinos que tienen. Al ser una red saturada la mayoría de los vecinos son de alto nivel, asignando canales con los que sigue existiendo interferencia co-canal. Conforme la distancia promedio va aumentando el desempeño de todos los algoritmos mostrados en la Figura 6.4 es similar con pequeñas diferencias entre ellos debido a que la red se encuentra menos saturada y el número de AP que se interfieren mutuamente disminuye considerablemente.

6.2. Algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad

Una vez que el algoritmo de asignación de canales se ha ejecutado, pasamos ahora a ejecutar el algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad con el objetivo de obtener un mejor desempeño de los AP en la red. Este segundo algoritmo fue utilizado de manera similar al primer algoritmo. La terminal móvil continua con su recorrido en el escenario de la red enviando recomendaciones a los elementos detectados en su camino.

Para realizar las pruebas del segundo algoritmo se partió de un escenario inicial donde todos los AP operan con la configuración *default* y en el mismo canal. Lo anterior es equivalente un escenario donde el algoritmo de selección de canal divide a la red en subgrupos que trabajan en el mismo canal, y es sobre uno de estos subgrupos donde se ejecuta el segundo algoritmo de selección de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad.

La Tabla 6.3 presenta los parámetros del algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad, se presentan casos con diferente distancia media de separación entre AP.

Experimento	1	2	3
Tiempo de Simulación	3 horas	3 horas	3 horas
Número de AP	10	10	10
Escenario m^2	200x200	500x500	1000x1000
Distancia media entre AP	50 m	195 m	400 m
1er Vecino más Cercano	17 m	80 m	153 m
2o Vecino más Cercano	27 m	116	m 231 m
3er Vecino más Cercano	35 m	144 m	290 m

Cuadro 6.3: Parámetros de experimentos del algoritmo de selección de potencia y umbral de sensibilidad

La Figura 6.5 muestra tres topologías con las cuales se probó el algoritmo de asignación de selección de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad. De manera similar a los experimentos del algoritmo de selección de canal, se generaron tres tipos de topologías correspondientes a saturación alta, media y baja de AP por unidad de área. Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a tres escenarios específicos y por lo tanto los resultados son muy dependientes de las posiciones de los nodos en esos escenarios. Posteriormente se mostrarán resultados promedio resultado de realizar decenas de experimentos para cada densidad de AP.

En el escenario con saturación alta la terminal móvil puede conocer la posición y configuración de los AP y clientes que conforman la red rápidamente, debido a que se encuentra dentro del rango de transmisión de la mayoría de los AP al inicio del recorrido. Dicha Figura muestra también el

desempeño obtenido por cada AP de la red. La columna azul representa el *throughput* obtenido con la configuración inicial default. En este caso se genera un solo cambio de configuraciones con los AP en esta red al principio del recorrido de la terminal móvil ya que tiene conexión con todos los AP. Se puede observar que existen un par de AP que obtienen un menor *throughput* comparado con el desempeño inicial, mientras que el resto de los AP presentan un aumento en su desempeño. En este caso uno de los AP afectados tiene a su cliente a una distancia considerable, mientras que el otro AP disminuyó su potencia de transmisión para no afectar a sus vecinos. Sin embargo, ambos AP se ven afectados por la interferencia generada por AP aledaños reduciendo el *throughput* generado.

Para el experimento con la topología de saturación media (Figura 6.5 c y d) se observa que la mayoría de los AP interfieren entre sí, aunque no todos de manera simultánea como en el caso anterior. En cuanto a los cambios generados por la terminal móvil observamos que se generan más cambios en contraste al experimento anterior. Respecto al desempeño obtenido, la mayoría de los AP obtienen una mejora en el *throughput* una vez que se alcanza el estado estable.

Por último, tenemos el escenario de una red poco saturada (Figura 6.5 e y f), la cual presenta poca interferencia entre los AP del escenario. En cuanto al desempeño obtenido observamos que se generó un cambio menos comparado con el experimento anterior, debido a que el área es mayor. En este caso la mayoría de los AP presentan una mejora en su desempeño comparado con el desempeño inicial. Algunos de los AP permanecen con un desempeño estable sin verse afectados por los cambios generados en otros AP debido a que se ubican muy alejados de esos vecinos. Únicamente uno de los AP presenta una disminución en su desempeño al estar ubicado en una zona de mayor interferencia.

La Figura 6.6 presenta el comportamiento del *throughput* durante el tiempo de simulación. La gráfica de la izquierda presenta el desempeño de cada AP de manera individual, mientras que la gráfica de la derecha presenta el desempeño del *throughput* promedio de toda la red.

Para la red con saturación alta se observa que la mayoría de los AP presentan un aumento en su desempeño a excepción de dos AP. En el desempeño promedio de la red se observa que se genera una mejora en comparación con el desempeño inicial. A pesar de enviar las recomendaciones de cambios todos los AP se encuentran operando dentro del mismo canal de transmisión la interferencia entre ellos continúa, por lo que la mejora de *throughput* es pequeña. El tiempo para alcanzar el estado estable es mayor al algoritmo de asignación de canales debido a que este algoritmo busca las parejas de vecinos más cercanos para enviar las recomendaciones de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad. Debido a distancias cortas entre AP, la terminal móvil es capaz de detectar a todos los AP casi de manera inmediata, y poder analizar las configuraciones actuales de cada AP y enviar las recomendaciones en pocos segundos. Este experimento alcanza su punto de estabilización en alrededor de 8 minutos del tiempo de simulación.

Para el segundo experimento con una red de saturación media se observa que el comportamiento de cada AP varía más, y tarda cerca de 10 minutos en alcanzar un desempeño en estado estable. La mayoría de los AP alcanzan un desempeño máximo del *throughput* en estado estable. En cuanto al desempeño promedio de la red se observa que tras realizar cada cambio en la red el desempeño promedio va a aumentando, alcanzando un estado estable a los 10 minutos de simulación.

Por último, para la red con saturación baja no todos los AP presentan cambios en su desempeño durante el experimento. De los que, si presentan cambios en su comportamiento, la mayoría aumenta el *throughput* obtenido. En cuanto al desempeño promedio se presentan mejoras en el *throughput*. La red llega al estado estable pasadas algunas horas de simulación.

En general se observa que el algoritmo de selección de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad mejora el desempeño de la red. Cabe resaltar que el algoritmo tiene un mejor desempeño en escenarios con saturación media o baja, ya que en una saturación alta el algoritmo no genera mejoras importantes en el desempeño de la red comparado con los otros casos. Lo anterior se debe a que aun cuando se reduzca la potencia de transmisión y el umbral de sensado, el rango

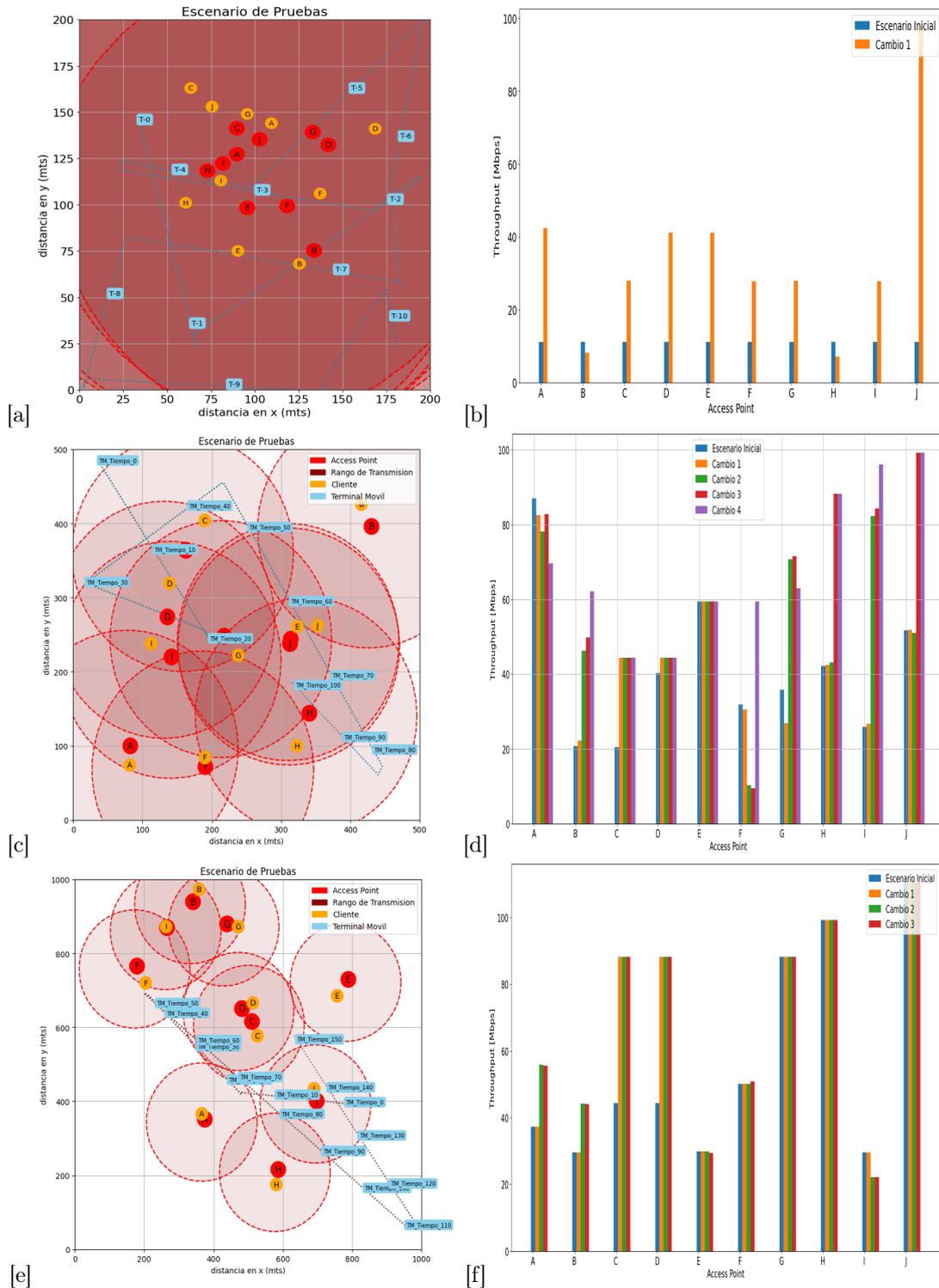


Figura 6.5: Topologías y experimentos específicos realizados con el algoritmo de potencia y umbral de sensibilidad para tres densidades distintas.

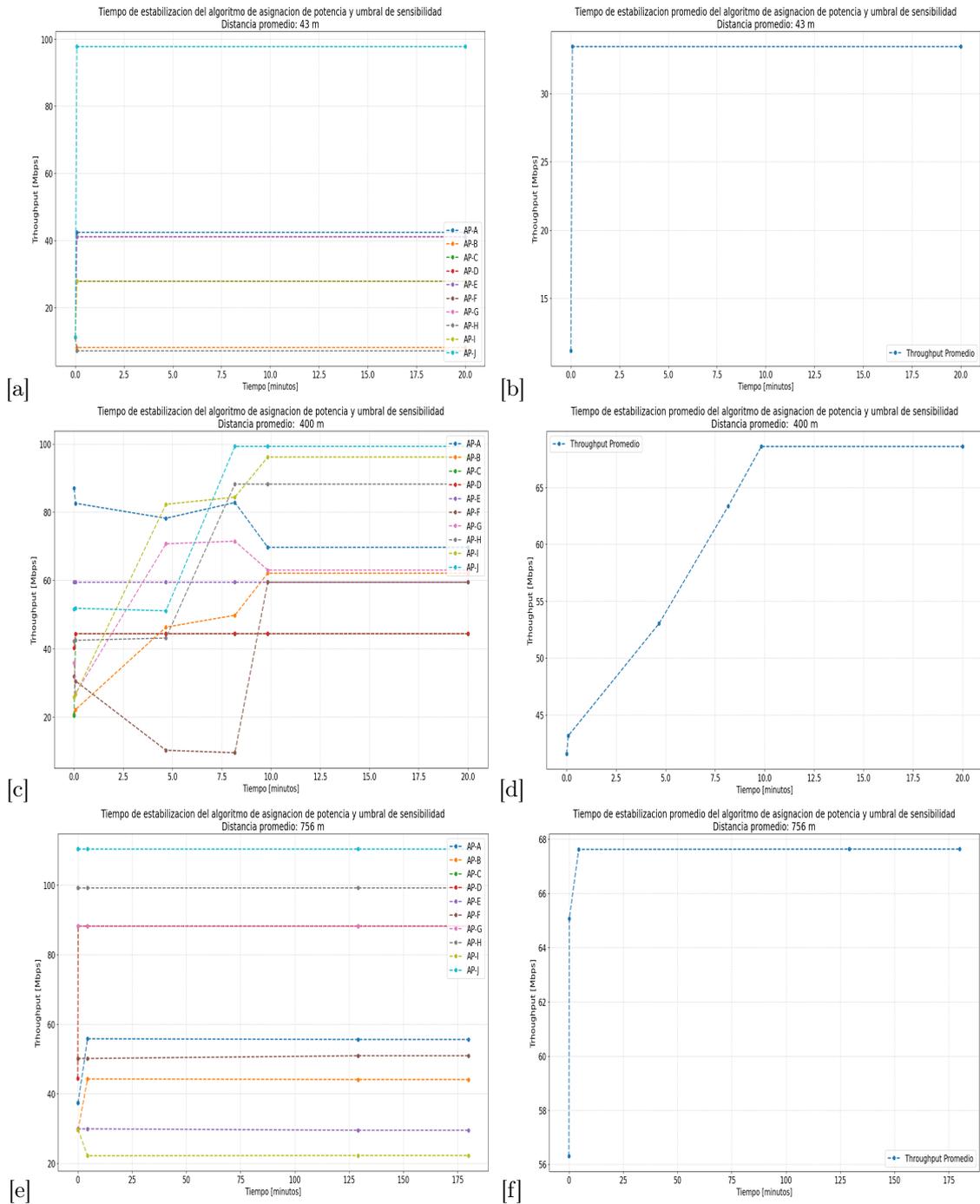


Figura 6.6: Comportamiento del *throughput* de forma individual y promedio para experimentos específicos realizados con el algoritmo de potencia y umbral de sensibilidad.

de transmisión de la mayoría de los AP continúa abarcando a toda la red, es decir, continúan interfiriéndose entre sí. El algoritmo propuesto cambia las configuraciones del par de AP más cercanos, pero debido a la alta densidad del escenario y a que todos los AP operan en el mismo canal hace difícil que la interferencia generada por un AP no afecte al resto de los AP en la red de estudio.

Los experimentos anteriores consideran tres topologías muy específicas donde la posición de AP y clientes tiene un peso específico muy importante en los resultados obtenidos. Para obtener resultados generales del algoritmo es necesario realizar docenas de simulaciones con posiciones diferentes de los AP y sus clientes para poder caracterizar de mejor manera el comportamiento del algoritmo propuesto. Para este propósito se usaron los mismos escenarios usados en [7], y es sobre estos escenarios que se pone a prueba nuestro algoritmo y los dos algoritmos propuestos en [7]. Por un lado, el algoritmo *Single* [7], que considera sólo la pareja de vecinos más cercanos entre sí, mientras que el algoritmo de Tercias [7] opera con los dos vecinos más cercanos a cada AP. Una vez determinados los vecinos más cercanos para cada AP se simula el escenario donde la terminal móvil prueba diferentes configuraciones y envía sus recomendaciones de cambio de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad a cada AP en su recorrido. La Tabla 6.4 presenta las características utilizadas para las simulaciones realizadas.

Experimento	Tiempo de Simulación	Número de AP	Escenario m^2	Distancia media entre AP
1	3 horas	12	300x300	100 m
2	3 horas	12	500x500	200 m
3	3 horas	12	700x700	300 m
4	3 horas	12	900x900	400 m

Cuadro 6.4: Parámetros de experimentos del algoritmo de selección de potencia y umbral de sensibilidad

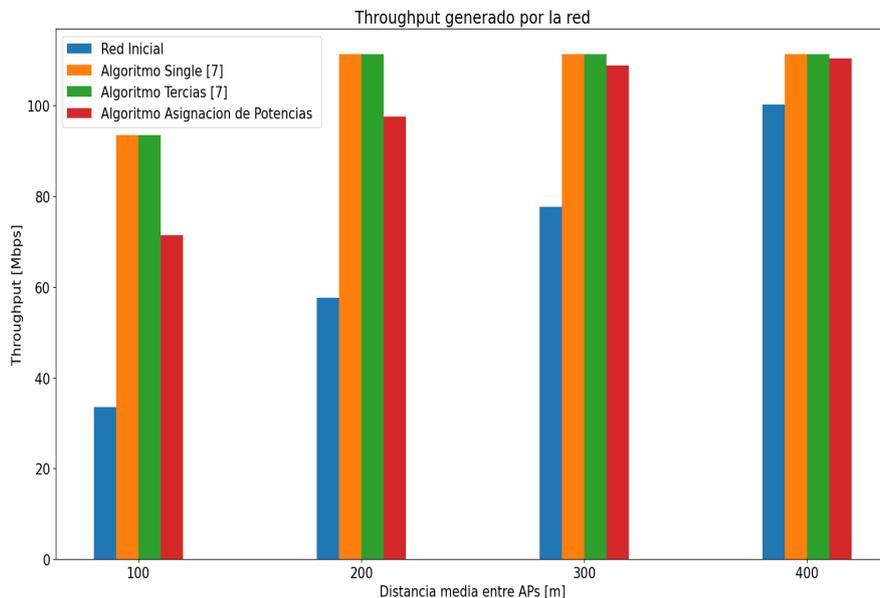


Figura 6.7: Comparativa de desempeño entre algoritmos de asignación de potencia y umbral de sensibilidad

La Figura 6.7 muestra la comparación entre los resultados obtenidos por la red con la configuración inicial (*default*) y por los dos algoritmos propuestos en [7]. En cuanto a los resultados observamos que nuestro algoritmo genera una mejora en cuanto al desempeño del *throughput* pro-

medio de la red. Para distancias menores a 200 metros nuestro algoritmo se ve rebasado por el trabajo en [7], mientras que para distancias mayores el resultado es bastante similar. Los algoritmos *Single* y *Tercias* presentados en [7] son algoritmos distribuidos capaces de generar cambios en la configuración de operación una vez que detectan a sus AP vecinos, sin necesidad de una entidad externa que obtenga dichas configuraciones, y que consideran las coordenadas exactas de los AP y sus clientes. Con las coordenadas exactas se procede en [7] a simular diferentes combinaciones de configuraciones de operación identificando las mejores combinaciones. En ese sentido la base de datos que posee la terminal móvil y que utiliza el algoritmo de asignación de potencia y umbral de sensibilidad presenta un error entre las coordenadas reales de los AP y sus clientes y las coordenadas aproximadas que se usaron al generar la base de datos. Esta situación puede explicar la pequeña diferencia en desempeño del algoritmo propuesto.

6.3. Ambos algoritmos operando de forma simultánea

Adicionalmente, se ejecutaron múltiples experimentos en los cuales se pusieron a prueba la operación de los dos algoritmos propuestos en este trabajo de manera simultánea. Esta es la forma de operación normal de los algoritmos propuestos pues en un solo recorrido de la terminal móvil puede modificar el canal de operación, la potencia de transmisión y el umbral de sensibilidad de los AP que se encuentren en su camino. Para efectos de comparación también se muestra en la misma gráfica cual es el beneficio de sólo ejecutar uno de los dos algoritmos. Los escenarios utilizados para estos experimentos fueron los mismos usados anteriormente, clasificándolos en tres distancias medias entre AP de 40, 200 y 500 metros de separación. En la Figura 6.8 se presentan los resultados obtenidos de dichos experimentos.

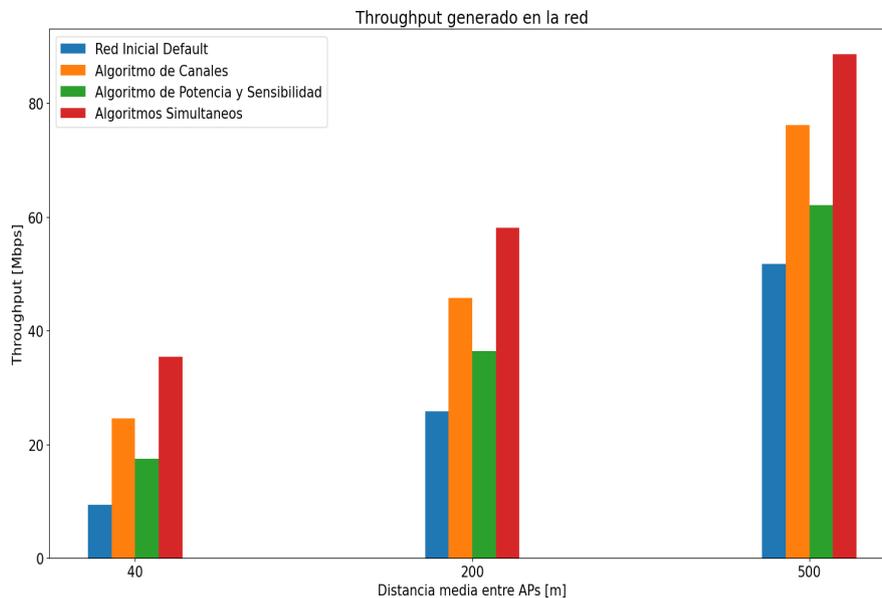


Figura 6.8: Comparativa de desempeño de los algoritmos de manera individual y en conjunto

La barra azul en la Figura 6.8 representa el *throughput* obtenido por la red inicial (*default*). La barra naranja muestra el resultado final de aplicar el algoritmo de asignación de canales únicamente, la barra verde muestra el *throughput* obtenido al aplicar únicamente el algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad, y, finalmente, la barra de color rojo muestra el resultado de ejecutar la simulación con ambos algoritmos trabajando de manera simultánea.

Podemos mencionar que el resultado de aplicar ambos algoritmos de forma simultánea alcanza un *throughput* mayor al obtenido con los algoritmos operando independientemente. Por otra parte,

el algoritmo de asignación de canal presenta mejores resultados que el algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad al ejecutarse de manera individual en los tres escenarios simulados. Lo anterior se debe a que elimina o reduce directamente la interferencia generada entre los AP. En cambio, el algoritmo de asignación de potencias y umbral de sensibilidad resulta más efectivo en escenarios que no se encuentren muy saturados debido a que se reduce el número de AP que interfieren mutuamente.

En la Figura 6.8 se observa que la mejoría en el desempeño de la red se concentra principalmente en el algoritmo de asignación de canal ya que los resultados de aplicar este algoritmo de manera individual se equiparan al resultado obtenido con ambos algoritmos operando de forma simultánea. Aunque operan en el mismo tiempo de simulación, el algoritmo de asignación de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad opera posteriormente al algoritmo de asignación de canales. Únicamente cuando ya no es posible enviar recomendaciones de cambio de canal a los AP de la red usando el primer algoritmo cuando se ejecuta el segundo algoritmo. Para casos de redes no saturadas (500 m.), observamos que ejecutar los dos algoritmos simultáneamente brinda casi el mismo resultado que el algoritmo de asignación de canal debido a que existen muy pocas zonas de interferencia entre AP, zonas que pueden evitarse simplemente poniendo a los nodos involucrados en canales diferentes.

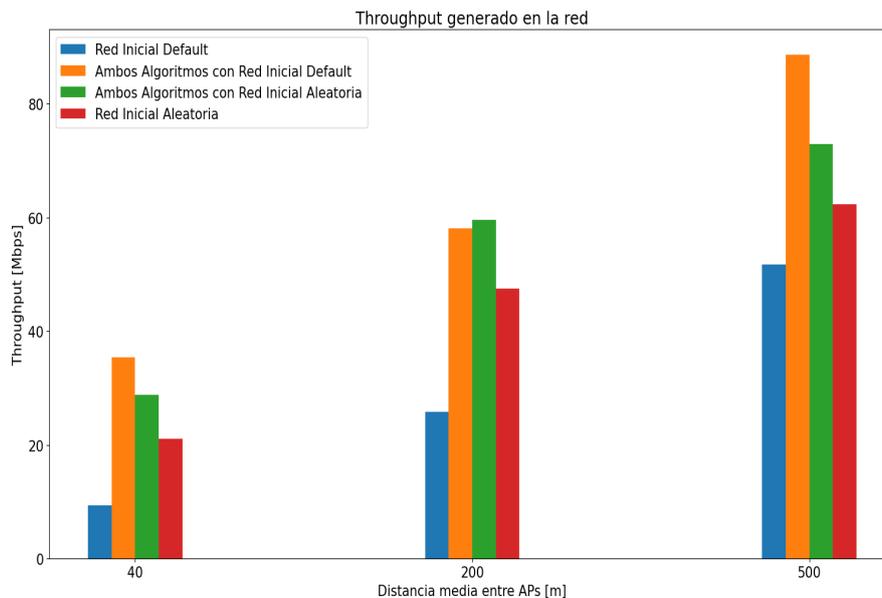


Figura 6.9: Comparativa de desempeño de los algoritmos configuraciones default vs aleatorias

La Figura 6.9 presenta una comparativa de desempeño entre los resultados obtenidos al utilizar ambos algoritmos operando de manera simultánea, pero considerando el caso cuando la configuración inicial de los AP no es la configuración 1 sino una configuración aleatoria (canal aleatorio y potencia de transmisión y umbral de sensibilidad aleatorios). Se observa primero que la red operando con configuración aleatoria supera en desempeño a una red que opere con configuración *default*. Lo anterior se debe a que en la configuración *default* todos los AP se encuentran en el mismo canal generando mayor interferencia que la red aleatoria donde los canales pueden ser diferentes. Los algoritmos propuestos generan un aumento en el *throughput* obtenido comparado con las configuraciones iniciales (*default* y aleatoria), la terminal móvil detecta a los AP que operan en el mismo canal, ejecuta los algoritmos y genera recomendaciones para optimizar el desempeño de los AP detectados. Se observa que los resultados de ejecutar los algoritmos en ambas redes difieren, cabe recordar que en la red aleatoria tanto canales como configuraciones de operación se asignan al azar, el algoritmo de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad actúa únicamente cuando dos AP cercanos operan en el mismo canal, de ser así se ejecuta y busca las mejores configuraciones

de operación, sin embargo, al operar en diferentes canales este algoritmo no se ejecuta y por ende la configuración de operación de cada AP no es la óptima, mermando el desempeño final de la red.

6.4. Múltiples terminales móviles

Experimento	1	2	3
Tiempo de Simulación	3 horas	3 horas	3 horas
Número de AP	10	10	10
Escenario m^2	500 m	1000 m	1500 m
Distancia media entre AP	217 m	501 m	795 m
1er Vecino más Cercano	75 m	182 m	294 m
2o Vecino más Cercano	111 m	288 m	m 431 m
3er Vecino más Cercano	146 m	367 m	551 m

Cuadro 6.5: Parámetros de los experimentos con varias terminales.

En todos los experimentos realizados anteriormente se consideró una sola terminal móvil que atraviesa el área de estudio. En esta sección se presentan experimentos realizados con el algoritmo de selección de canales utilizando varias terminales móviles operando al mismo tiempo. El objetivo es analizar el desempeño y tiempo de convergencia de los algoritmos propuestos cuando varias terminales móviles se mueven en la red al mismo tiempo. En los experimentos realizados se varió la distancia media entre AP y se consideran experimentos con 1, 2, 3, 5 y hasta 10 terminales móviles operando simultáneamente. Las características de los escenarios simulados se presentan en la Tabla 6.5.

La Figura 6.10 muestran el desempeño de la red durante el tiempo de simulación, así como el efecto de tener varias terminales móviles realizando recorridos en los escenarios generados. Dicha figura 6.10 presenta una red saturada con distancia media de 200 metros. En este caso el recorrido realizado con una sola terminal móvil (color azul) tarda cerca de quince minutos en recorrer la topología y enviar todas las recomendaciones de cambios a los AP para que el *throughput* alcance estado estable. Posteriormente se consideran dos terminales móviles (color naranja) recorriendo la red y el tiempo para alcanzar el estado estable se reduce a cinco minutos, pero el desempeño obtenido es menor que cuando solo había una terminal móvil. Posiblemente esto se deba al punto de partida de las terminales y la trayectoria seguida ya que las terminales móviles envían recomendaciones basándose en los AP detectados en un tiempo determinado. La barra verde muestra el desempeño con tres terminales móviles y, en este caso, el *throughput* obtenido mejora comparándolo con los casos anteriores, además, el tiempo de estabilización se reduce aproximadamente a tres minutos. La barra en color rojo muestra el desempeño de la red con cinco terminales móviles y en donde el *throughput* final aumenta comparado con los escenarios anteriores y se reduce el tiempo para alcanzar estado estable. Por último, la barra color morado muestra el desempeño obtenido por la red al contar con diez terminales móviles moviéndose por la red. Este caso presenta el mejor desempeño de en todos los experimentos incluyendo un menor tiempo para alcanzar estado estable (poco más de un minuto).

En el escenario de saturación alta la mayoría de los AP generan interferencia entre sí. En estas condiciones la terminal móvil puede generar un reconocimiento rápido de la red, y puede desde un inicio enviar recomendaciones de cambios a todos los AP. Sin embargo, al encontrarse dentro de los rangos de detección de AP diferentes durante su recorrido el *throughput* de la red tarda cerca de quince minutos en alcanzar estado estable. Al trabajar con más terminales móviles este tiempo se reduce debido a que cada terminal sensa diferentes áreas de la red reduciendo el tiempo de convergencia.

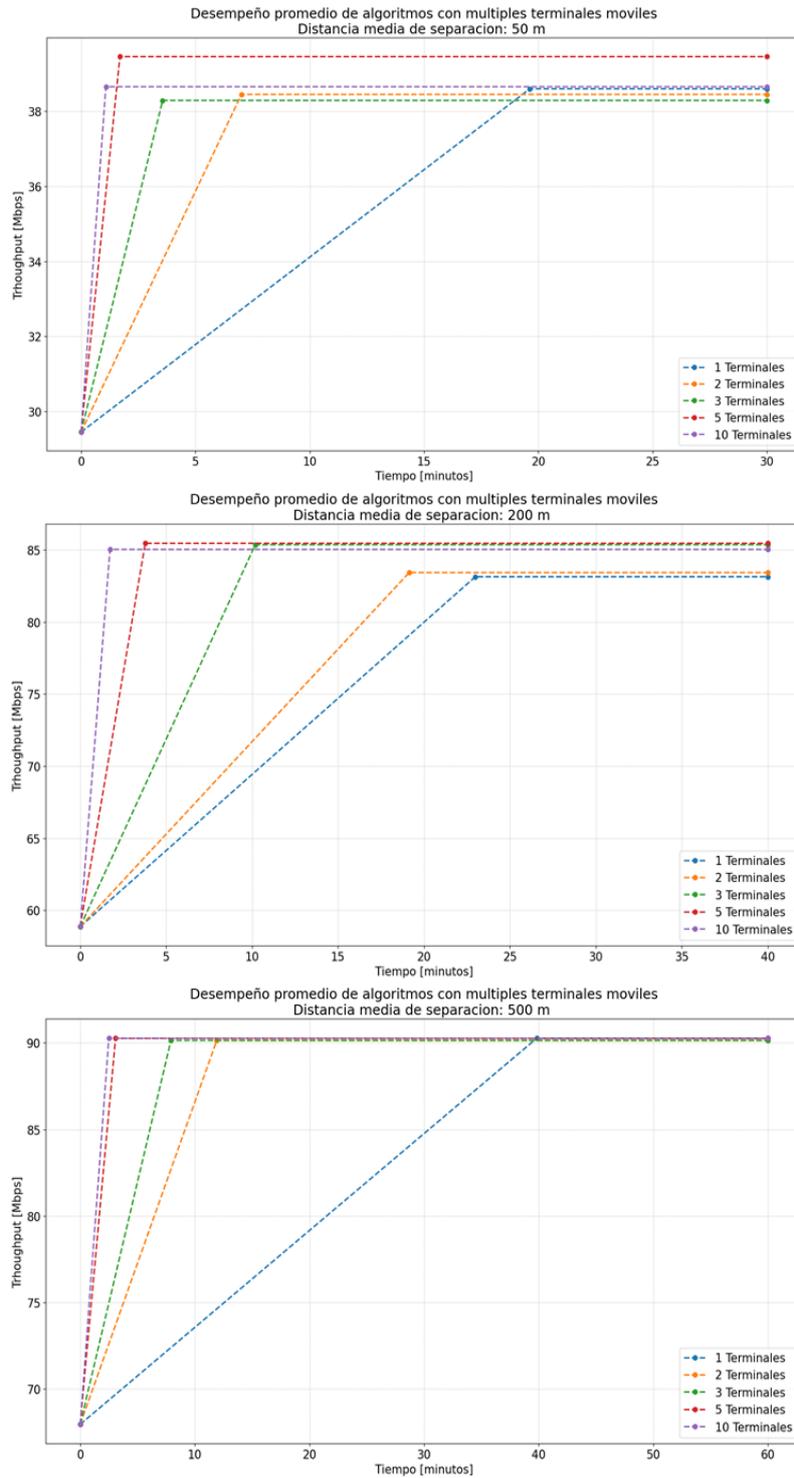


Figura 6.10: Desempeño de ambos algoritmos con múltiples terminales móviles en diferentes densidades

La Figura 6.10 presenta el desempeño promedio del *throughput* de la red a través del tiempo de simulación con una red de saturación media donde la separación media entre AP es de 500 metros. En esta red se utilizaron diferente número de terminales móviles. Observamos en la Figura 6.10 que al aumentar el número de terminales móviles que se encuentran sensando la red se obtiene

un mejor desempeño, viéndose reflejado en un menor tiempo de convergencia para que el sistema alcance es estado estable.

Podemos observar que al tener un área de la red más extensa con saturación media las terminales móviles tardan más tiempo en enviar todas sus recomendaciones a los AP. Al existir pocas terminales móviles recorriendo la red tardan más tiempo en identificar toda la topología presente y enviar recomendaciones. En cambio, al aumentar el número de terminales móviles que recorren la red se reduce el tiempo para alcanzar estado estable siendo de unos cuantos minutos.

Por último, se realizaron experimentos con una red no saturada implementada en un área grande en la cual existen pocas áreas de interferencia entre AP. La Figura 6.10 presenta el desempeño obtenido por la red durante el tiempo de simulación. De manera similar a las topologías anteriores se observa que al implementar una sola terminal móvil en la red se tarda bastante (aproximadamente 40 minutos) en que el desempeño de la red alcance estado estable, mientras que al aumentar el número de terminales móviles el tiempo para alcanzar dicho estado se reduce, (aproximadamente 5 minutos con diez terminales móviles).

En estos experimentos se observa que con cualquier número de terminales móviles se alcanza el mejor *throughput* observado debido a que al existir pocas zonas de interferencia los cambios realizados por cada terminal son los mismos. Lo que más destaca es el tiempo que tarda el desempeño de la red en alcanzar el estado estable, el cual se reduce significativamente al incluir una terminal móvil extra ya que las terminales pueden detectar diferentes áreas de la red en un menor tiempo y enviar recomendaciones independientemente sin esperar a que una sola terminal móvil recorra toda la red.

Capítulo 7

Discusión

Las redes de datos son vitales para nuestra vida cotidiana, sobre todo las redes inalámbricas debido a su practicidad y comodidad. Sin embargo, los recursos que estas poseen (canales de operación) son limitados. Por este motivo se han propuesto diferentes algoritmos capaces de administrar los recursos de la red inalámbrica y proponer las mejores configuraciones de operación incluyendo variables como canal de operación, potencia de transmisión y umbral de sensibilidad. La mayoría de los algoritmos propuestos en la literatura para este propósito se pueden dividir en centralizados y distribuidos. Los algoritmos centralizados presentan varias desventajas que incluyen el tiempo de convergencia de los algoritmos, debido al gran número de combinaciones y configuraciones posibles que aumenta exponencialmente con el número de nodos, requiriendo de mayor tiempo y poder de procesamiento para encontrar las mejores combinaciones. Por otro lado, los algoritmos distribuidos tienen la limitante que un nodo sólo puede “ver” lo que sucede dentro de su rango de transmisión, y por lo tanto está ciego de lo que sucede en el resto de la red y que tiene un impacto en su propio desempeño.

En este trabajo se propuso la idea de implementar algoritmos que cambien los parámetros de operación de los nodos de la red usando una terminal móvil. La ventaja directa que encontramos con este nuevo paradigma es que la terminal móvil es capaz de encontrar, analizar y enviar recomendaciones a un grupo de AP vecinos que generen interferencia entre sí, sin necesidad de analizar el número global de posibles combinaciones de configuraciones para cada AP, reflejándose en menores tiempos de convergencia para que el desempeño de la red alcance estado estable. Considero que esta propuesta es novedosa, ya que en la literatura el uso de las terminales móviles se enfoca al análisis pasivo de ésta, más no en que terminales móviles interactúen directamente con ella.

En este trabajo se propusieron dos algoritmos, uno enfocado en la asignación de canales de operación y otro enfocado a la asignación de potencias de transmisión y umbral de sensibilidad.

El primer algoritmo propuesto considera tres canales ortogonales (banda ISM de los 2.4 GHz) y fue probado en redes con diferente densidad de AP y comparado con otros algoritmos similares [8] y [7]. El algoritmo propuesto presenta una mejora en comparación con el caso cuando los AP usan la configuración *default* (mismo canal y configuración de potencia y umbral de sensibilidad). Comparado con otros algoritmos similares en la literatura, el algoritmo propuesto tiene un comportamiento similar, y en algunos casos supera el desempeño de otros algoritmos como DSATUR [8]. Comparado con [7], el algoritmo propuesto presenta resultados similares, aunque para densidades altas el desempeño de los algoritmos propuestos es ligeramente inferior. El algoritmo propuesto muestra una mejora en el desempeño comparada con la configuración *default*, pero no supera el rendimiento de los algoritmos en [8] y [7]. Esto es debido a que la mayoría (o todos) los AP generan interferencia mutua, volviendo imposible eliminar la interferencia entre ellos. Para escenarios con una saturación media o baja (escenarios de más de 200x200m), el desempeño del algoritmo propuesto es bastante similar al desempeño obtenido por los otros algoritmos considerados [8] y [7], llegando a superarlos en algunos casos.

El segundo algoritmo propuesto busca asignar la mejor configuración de potencia de transmisión y umbral de sensibilidad a cada AP en la red. Su funcionamiento se centra en que la terminal móvil envía recomendaciones de configuración a la pareja de vecinos más cercanos mientras se desplaza por la red, comparando la topología encontrada con una base de datos precargada y que entrega la mejor configuración para cada AP en cada caso. El desempeño del algoritmo supera al desempeño cuando la red utiliza una configuración *default* de potencia de transmisión alta y umbral de sensibilidad bajo. Sin embargo, no es tan eficiente como el algoritmo presentado en [7], sobre todo para redes altamente saturadas. De manera similar a lo ocurrido con el algoritmo de asignación de canal se vuelve bastante difícil reducir la interferencia generada en la red si los AP están muy cerca unos de otros. Observamos que el mejor desempeño del algoritmo propuesto se ubica en redes con saturación media (escenarios de más de 200x200m).

Al implementar los dos algoritmos de manera simultánea se obtiene el mayor desempeño de la red, en contraste con el uso de los algoritmos de manera individual dentro del mismo escenario. Cabe destacar que el tiempo de convergencia está en el orden de (minutos) gracias a la memoria implementada en la terminal móvil. La terminal móvil puede obtener los parámetros de la red en un primer recorrido para aplicar los algoritmos en un recorrido posterior. A pesar de este hecho, el tiempo para alcanzar estado estable de los algoritmos propuestos es bastante bajo en comparación a otros algoritmos que utilizan *machine learning*, los cuales suelen ser centralizados y tardan mucho tiempo en converger. Nuestros algoritmos presentan una reacción rápida ante cambios generados por un AP (por ejemplo, su posición o la de su cliente). Por otra parte, se realizaron experimentos con un diferente número de terminales móviles y se observa que al aumentar el número de terminales es posible disminuir el tiempo de convergencia debido a que las terminales pueden compartir información entre ellas. Se observa que al tener 5 o más terminales móviles recorriendo el escenario se obtiene un mejor tiempo de convergencia para que la red alcance su mejor desempeño.

7.1. Recomendaciones

El trabajo presentado en esta tesis fue estudiado a partir de un entorno simulado en su totalidad y sin tomar en cuenta algunas consideraciones respecto a temas de seguridad y comunicación con los AP dado que esto no formaba parte de los objetivos principales del proyecto. Por esto consideramos importante para un posible trabajo futuro la implementación de credenciales de acceso en una terminal móvil que recorra una red experimental real. En este trabajo se menciona el uso de la técnica DoE [22] como posible medio para obtener la localización de los AP y sus clientes, la cual puede ser otro factor importante para la implementación real del trabajo. Por último, como posible idea para mejorar el desempeño de los algoritmos sería implementar Komondor en las terminales móviles y utilizarlo en tiempo real obteniendo resultados más exactos para escoger las mejores configuraciones para los AP de la red.

Capítulo 8

Conclusiones

En este trabajo se presenta una propuesta novedosa para solucionar la saturación de recursos en redes inalámbricas mediante una terminal móvil que funge como un elemento pasivo capaz de analizar y enviar recomendaciones de configuraciones de operación a los AP detectados en su camino y sin necesidad de contar con recursos computacionales complejos y largos tiempos de convergencia.

Tanto el algoritmo de asignación de canales como el algoritmo de asignación de potencias de transmisión y umbral de sensibilidad propuestos generan mejoras en el desempeño de la red, además de mostrar desempeños similares otros algoritmos similares de la literatura pero que requieren de más recursos computacionales o tardan más tiempo en converger.

Ambos algoritmos generan ventajas al ser aplicados de manera individual comparado con redes que operen con la configuración *default* (Configuración 1) o con una configuración aleatoria. Sin embargo, aplicar ambos algoritmos de manera simultánea presenta el mejor desempeño en cuanto al *throughput* obtenido por los nodos de la red.

Se observa que los algoritmos propuestos logran un mejor desempeño para redes con saturación media y baja. Para redes con saturación alta existe una mejora en el desempeño, sin embargo resulta ligeramente inferior a otros algoritmos encontrados en la literatura.

El uso de la terminal móvil presenta la ventaja de tener tiempos de convergencia mucho menores a otros algoritmos siendo en el orden de minutos para los escenarios estudiados. El uso de varias terminales móviles reduce el tiempo de convergencia de manera significativa.

Como parte del trabajo futuro debe considerarse la implementación práctica de los algoritmos tomando en cuenta aspectos de seguridad y técnicas de geolocalización de nodos. Por otra parte, se puede optimizar el desempeño de los algoritmos propuestos si la terminal móvil tiene instalado el simulador Komondor y de esta forma poder obtener resultados más precisos de la configuración de los nodos en la red.

Bibliografía

- [1] SCHWARTZ M. (2005). **Mobile Wireless Communications**. New York: Cambridge University Press. ISBN-13 978-0-511-26423-8
- [2] International Telecommunication Union. **Definiciones ITU**. 14/04/2022, de ITU.net Sitio web: <https://www.itu.int/net/ITU-R/terrestrial/faq/index.htmlg013>
- [3] MOLISCH A. (2011). **Wireless communications**. United Kingdom: Wiley and sons. IEEE. ISBN: 978-0-470-74187-0
- [4] ERGEN M. (2002). **IEEE 802.11 tutorial**. California U.S.A: University of California Berkeley.
- [5] IEEE SPECIFIC REQUIREMENTS (1999). **Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**. ANSI/IEEE.
- [6] LEWIS R. (2016). **A guide to graph colouring**. Switzerland: Springer. ISBN: 978-3-319-257228-0
- [7] REYES E. (2019). **Mejoramiento del Reúso Espacial en Redes IEEE 802.11** CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México
- [8] BRÉLAZ D. (1979). **New Method to Color the Vertices of a Graph**. 22: Communications og the ACM 22. DOI:10.1145/359094.359101
- [9] GARCIA P., VIDAL R., PARADELLS J. (2008). **Frequency assignments in IEEE 802.11 WLANs with efficient spectrum sharing**. España: Wiley InterScience. DOI:10.1002/wcm.670
- [10] SAN SEGUNDO P. (2013). **A new DSATUR-based algorithm for exact vertex coloring**. Madrid, España: Centro de Automática y Robótica (CAR).
- [11] GIMENEZ-GUZMAN J., MARSA-MAESTRE I., ORDEN D., ET AL. (2018). **On the Goodness of Using Orthogonal Channels in WLAN IEEE 802.11 in Realistic Scenarios**. España: Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing. DOI: 10.1155/2018/5742712
- [12] NAKASHIMA K., KAMIYA S., OHTSU K., ET AL. (2019). **Deep Reinforcement Learning-Based Channel Allocation for Wireless LANs with Graph Convolutional Networks**. Kyoto, Japón: IEEE Vehicular Technology Conference-Fall. DOI: 10.1109/ACCESS.2017
- [13] LEITH D.J., CLIFFORD P., MALONE D.W. (2012). **WLAN Channel Selection Without Communication**. Maynooth Ireland: Hamilton Institute, National University of Ireland. DOI:10.1016/j.comnet.2011.12.015
- [14] MHATRE V., PAPAGIANNAKI K., BACCELLI F. (2007). **Interference Mitigation through Power Control in High Density 802.11 WLANs**. IEEE INFOCOM. DOI: 10.1109/INF-COM.2007.69
- [15] JAMIL I., CARIOU L., HÉLARD J.F. (2016). **Novel learning-based spatial reuse optimization in dense WLAN deployments**. EURASIP Journal on wireless communications and networking. DOI: 10.1186/s13638-016-0632-2

- [16] WILHELMI F., BARRACHINA-MUÑOZ S., CANO C., ET AL. (2021). **Spatial Reuse in IEEE 802.11ax WLANs**. Barcelona, España: Wireless Networking Research Group. DOI:10.1016/j.comcom.2021.01.028
- [17] WILHELMI F., BARRANCHINA-MUÑOZ S., BELLATA B, ET AL. (2020). **A Flexible Machine Learning-Aware Architecture for Future WLANs**. IEEE Communications Magazine (Volume: 58). DOI: 10.1109/MCOM.001.1900637
- [18] WILHELMI F., BARACHINA-MUÑOZ S., BELLATA B. (2019). **On the Performance of the Spatial Reuse Operation in IEEE 802.11ax WLANs**. Barcelona, España: Universitat Pompeu Fabra. DOI: 10.1109/CSCN.2019.8931315
- [19] DUBOIS F., GROSSGLAUSER M., VETTERLI M. (2003). **Age Matters: Efficient Route Discovery in Mobile Ad Hoc Networks Using Encounter Ages**. Lausanne, Switzerland. DOI: 10.1145/778415.778446
- [20] YUAN S., ZHU Y., WU X., ET AL. (2008). **Mobility Assisted Routing Strategy (MARS) for Hybrid Ad Hoc Networks**. China: Xi'an Jiaotong University.
- [21] BAI F., HELMY A. (2005). **Impact of Mobility on Mobility Assisted Information Diffusion (MAID) Protocols**. California, U.S.A.: University of Southern California. DOI: 10.1.1.62.1492
- [22] PASCOE M., GOMEZ J., BONILLA V., ET AL. (2014). **Direction of Encounter (DoE): A Mobility-Based Location Method for Wireless Networks**. IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, VOL. 13. DOI: 10.1109/TMC.2014.2311993
- [23] SHI J., GUAN Z., QIAO C., ET AL. (2014). **Crowdsourcing Access Network Spectrum Allocation Using Smartphones**. New York, United States: Department of Computer Science and Engineering, University at Buffalo. DOI: /10.1145/2670518.2673866
- [24] SHI J., MENG L., STRIEGEL A., ET AL. (2016). **A Walk on the Client Side: Monitoring Enterprise Wifi Networks Using Smartphone Channel Scans**. DOI: 10.1109/INFOCOM.2016.7524453
- [25] CHAKRABORTY A., RAHMAN S., GUPTA H, ET AL. (2017). **SpecSense: Crowdsensing for Efficient Querying of Spectrum Occupancy**. New York. U.S.A: Stony Brook University. DOI: 10.1109/INFOCOM.2017.8057113
- [26] BARRACHINA-MUÑOZ S., WILHELMI F. (2018). **Komondor: an Event-Based Wireless Network Simulator for Next-Generation IEEE 802.11ax WLANs**. <https://github.com/wn-upf/Komondor>
- [27] BARRACHINA-MUÑOZ S., WILHELMI F. (2018). **Komondor User's Guide**. <https://github.com/wn-upf/Komondor>
- [28] PENA S. (2017). **El problema de coloración de grafos**. España: Universidad de Coruña.
- [29] Rodriguez P. (13/06/2019). **Cómo mejorar la velocidad de tu WiFi eligiendo correctamente el canal**. 12/06/2022, de Xataka <https://www.xatakahome.com/la-red-local/como-mejorar-velocidad-tu-wifi-eligiendo-correctamente-canal-ejemplo-practico>.